

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

MODELIRANJE ATMOSFERSKOG GRANIČNOG SLOJA U  
ZRAČNOM TUNELU

MAGISTARSKI RAD

HRVOJE KOZMAR

ZAGREB, 2000.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

MODELIRANJE ATMOSFERSKOG GRANIČNOG SLOJA U  
ZRAČNOM TUNELU

MAGISTARSKI RAD

Mentor:

prof.dr.sc. ZDRAVKO DOLINER

HRVOJE KOZMAR

ZAGREB, 2000.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK:	551.510.522, 533.6.071
Ključne riječi:	atmosferski granični sloj, modeliranje, zračni tunel
Znanstveno područje:	TEHNIČKE ZNANOSTI
Znanstveno polje:	Strojarstvo
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje
Mentor rada:	Prof.dr.sc. Zdravko Doliner
Broj stranica:	104
Broj slika:	74
Broj tablica:	11
Broj korištenih bibliografskih jedinica:	60
Datum obrane:	
Povjerenstvo:	Dr.sc. Petar Kesić, izv. prof. Dr.sc. Zdravko Doliner, red. prof. Dr.sc. Luka Sopta, red. prof.
Institucija u kojoj je rad pohranjen:	Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje

## Sadržaj

Sadržaj.....	i
Predgovor.....	iii
Sažetak.....	iv
Kurzfassung.....	v
Popis slika.....	vi
Popis tablica.....	x
Popis oznaka i mjernih jedinica.....	xi
1. Uvod.....	1
2. Osnove.....	3
2.1. Atmosferski granični sloj.....	3
2.1.1. Profil osrednjenih brzina u aksijalnom smjeru.....	5
2.1.2. Intenzitet turbulencije.....	9
2.1.3. Spektar kinetičke energije turbulencije.....	12
2.1.4. Reynoldsovo tangencijalno naprezanje.....	14
2.2. Modeliranje atmosfere u zračnom tunelu.....	15
2.2.1. Opći kriteriji modeliranja.....	15
2.2.2. Sličnost strujanja.....	16
2.2.3. Spektar kinetičke energije turbulencije.....	18
2.2.4. Sličnost strujanja oko građevinskih objekata.....	20
2.3. Simuliranje atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu.....	21
2.3.1. Zračni tuneli s dugom mjernom sekcijom.....	21
2.3.2. Zračni tuneli s kratkom mjernom sekcijom.....	21
2.3.3. Ujednačenost strujnog polja u mjernoj sekciji zračnog tunela.....	22
3. Zračni tunel i modeliranje atmosferskog graničnog sloja.....	24
3.1. Zračni tunel.....	24
3.2. Metoda modeliranja atmosferskog graničnog sloja.....	27
3.2.1. Barijera.....	27
3.2.2. Generatori vrtloga.....	29
3.2.3. Podna hrapavost.....	31
4. Rezultati mjerenja i diskusija.....	35
4.1. Opis mjerne opreme i procesa mjerenja.....	35

4.1.1. Mjerenje tlaka .....	35
4.1.2. Mjerenje brzine .....	35
4.2. Izvršena mjerenja.....	38
4.3. Obrada i prikaz rezultata mjerenja.....	39
4.4. Rezultati mjerenja.....	42
4.4.1. Kalibriranje sonde za mjerenje statičkog tlaka .....	42
4.4.2. Kalibriranje pokazivača broja okretaja aksijalnog ventilatora.....	42
4.4.3. Mjerenje statičkog tlaka u stropu mjerne sekcije zračnog tunela .....	42
4.4.4. Modeliranje graničnog sloja .....	44
4.4.5. Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije .....	50
5. Zaključak.....	52
Literatura.....	54
Prilog A.....	61
Prilog B .....	67
Prilog C .....	70
Tablični životopis.....	103
Tabellarischer Lebenslauf.....	104

## Predgovor

Ovaj rad je nastao tijekom dvogodišnjeg znanstveno-istraživačkog boravka na Katedri za Mehaniku fluida Tehničkog Sveučilišta u Münchenu. Cilj istraživanja je ispitivanje mogućnosti modeliranja atmosferskog graničnog sloja u mjernoj sekciji zračnog tunela Counihanovom metodom i utjecaja varijacije različitih parametara na strukturu generiranog graničnog sloja.

Na financijskoj potpori zahvaljujem Ministarstvu znanosti i tehnologije Republike Hrvatske i Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD), koji su godišnjim stipendijama omogućili moj boravak u Münchenu.

Voditelju magistarskog rada prof.dr.sc. Zdravku Dolineru zahvaljujem na pruženoj pomoći, stručnim savjetima i kritičkom osvrtu na rad.

Prof. Dr.-Ing. Borisu Laschki, voditelju Katedre za Mehaniku fluida Tehničkog Sveučilišta u Münchenu, zahvaljujem na ukazanom gostoprimstvu i suradnji.

Dr.-Ing. Albertu Pernpeintneru, voditelju grupe za aerodinamiku zgrada Katedre za Mehaniku fluida Tehničkog Sveučilišta u Münchenu, zahvaljujem na potpori u radu i iscrpnim raspravama o rezultatima mjerenja.

Dipl.-Ing. Josefu Fischeru zahvaljujem na pomoći pruženoj prilikom svladavanja poteškoća vezanih uz mjernu opremu i provedbu eksperimenata.

Dipl.-Ing. Jesku Klammeru zahvaljujem na pomoći pri provedbi eksperimenata.

Djelatnicima radionica Katedre za Mehaniku fluida Tehničkog Sveučilišta u Münchenu zahvaljujem na pomoći pri izradi modela, korisnim primjedbama i sugestijama.

Ivi, Nastiji, Tomislavu i ostalim kolegama s Katedre za Mehaniku fluida Sveučilišta u Zagrebu zahvaljujem na pomoći pri obradi teksta, kao i preuzimanju nastavnih obveza tijekom mog odsustva.

Daliboru Ljubiću zahvaljujem na pomoći i savjetima prilikom obrade teksta.

Saša Krenek i Tomislav Cvrlje moj su boravak u Münchenu učinili ugodnim, na čemu im iskreno zahvaljujem.

Izuzetno cijenim strpljenje i potporu moje supruge Ane, sestre i roditelja, kao i cijele obitelji, koji su me svojim bodrenjem podržali u dovršenju ovog rada.

U Zagrebu, ožujka 2000.

Hrvoje Kozmar

## Sažetak

Tema rada je modeliranje atmosferskog graničnog sloja unaprijed određenih karakteristika u zračnom tunelu. Modelirani granični sloj odgovara graničnom sloju u atmosferi, koji nastaje uslijed strujanja zraka iznad predgrađa s niskim obiteljskim kućama.

U radu je prikazan princip nastajanja atmosferskog graničnog sloja, prikaz njegove strukture i zakonitosti kojih se treba pridržavati prilikom modeliranja u zračnom tunelu.

Ispitivanja su izvršena u zračnom tunelu C Katedre za Mehaniku fluida Tehničkog Sveučilišta u Münchenu.

Atmosferski granični sloj je u zračnom tunelu modeliran prema Counihanovoj metodi, uz korištenje barijere, generatora vrtloga i podne hrapavosti.

Istražen je utjecaj promjene visine barijere, visine ispupčenja na barijeri, te visine i gustoće razdiobe podne hrapavosti na strukturu generiranog graničnog sloja, kao i promjene strukture graničnog sloja u uzdužnom i poprečnom smjeru, te u odnosu na pojedinačne elemente podne hrapavosti i generatore vrtloga.

Također je ispitan i utjecaj nagiba stropa mjerne sekcije na profil statičkog tlaka uzduž mjerne sekcije pri različitim konfiguracijama podne hrapavosti.

Istraživanja potvrđuju mogućnost modeliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu i predstavljaju dobar temelj za buduća istraživanja.

## Kurzfassung

Das Thema dieser Arbeit ist die Modellierung der atmosphärischen Grenzschicht im Windkanal, wobei die Eigenschaften der atmosphärischen Grenzschicht, aufgrund der Messungen in der Natur, im Voraus angegeben wurden. Die modellierte atmosphärische Grenzschicht entspricht einer Grenzschicht in der Natur, die sich über einer Vorstadt bildet.

Wie die atmosphärische Grenzschicht entsteht, woraus ihre Struktur besteht, und was die Modellierungskriterien bei der Modellierung im Windkanal sind, wurde in dieser Arbeit diskutiert.

Die Untersuchungen wurden im Grenzschichtwindkanal des Lehrstuhls für Fluidmechanik der TU-München durchgeführt.

Als die Modellierungsmethode wurde die Counihan Methode gewählt, wobei die Barriere, die Wirbelgeneratoren und die Bodenrauigkeit angewendet wurden.

Untersucht wurde, wie die Änderung sowohl der Barrieren- und Zinnenhöhe als auch der Bodenrauigkeitshöhe und -dichte, die Struktur der modellierten Grenzschicht beeinflusst.

Es wurde auch untersucht, wie sich die Struktur der modellierten Grenzschicht, sowohl in der longitudinalen und lateralen Richtung, als auch im Bezug auf einzelne Bodenrauigkeitselementen und Wirbelgeneratoren ändert.

Der Einfluß von der Neigung der Windkanaldecke auf das Profil des statischen Drucks entlang der Meßstrecke wurde erforscht.

Diese Arbeit stellt fest, daß sich die atmosphärische Grenzschicht im Windkanal zufriedenstellend modellieren läßt, so daß diese Ergebnisse eine gute Basis für weitere Forschung in diesem Gebiet darstellen.



## Popis slika

Sl. 2.1: Coriolisova sila $F_c$ i sila $F_p$ uslijed polja tlaka .....	3
Sl. 2.2: Atmosferski granični sloj .....	4
Sl. 2.3: Coriolisova sila $F_c$ , sila $F_p$ uslijed polja tlaka i sila trenja $F_R$ .....	4
Sl. 2.4: Rezultat mjerenja brzine u prirodi .....	5
Sl. 2.5: Ovisnost eksponenta zakona potencije $\alpha$ o duljini hrapavosti $z_0$ .....	8
Sl. 2.6: Raspodjela intenziteta turbulencije struje zraka u prirodi .....	10
Sl. 2.7: Promjena intenziteta turbulencije u aksijalnom smjeru s visinom za dvije različite podloge .....	12
Sl. 2.8: Spektar kinetičke energije turbulencije u aksijalnom smjeru .....	13
Sl. 2.9: Spektar kinetičke energije turbulencije u aksijalnom smjeru mikrometeorološkog područja; usporedba empirijske krivulje s mjernim vrijednostima, prema (68) .....	13
Sl. 2.10: Srednja vrijednost eksponenta zakona potencije $\alpha_{3600}$ , ekstremna vrijednost eksponenta zakona potencije $\alpha_i$ i vrijednost koeficijenta trenja $\lambda_R/2$ kao funkcije duljine hrapavosti $z_0$ .....	17
Sl. 2.11: Profil intenziteta turbulencije u aksijalnom smjeru: usporedba rezultata mjerenja u zračnom tunelu i prirodi, prema [3] .....	18
Sl. 2.12: Spektar kinetičke energije turbulencije, prema [29] .....	19
Sl. 2.13: Metode modeliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu, prema [24] .....	23
Sl. 3.1: Po visini podesiv strop mjerne sekcije zračnog tunela .....	24
Sl. 3.2: Zračni tunel C za modeliranje atmosferskog graničnog sloja Katedre za Mehaniku fluida Tehničkog Sveučilišta u Münchenu .....	25
Sl. 3.3: Princip generiranja graničnog sloja po Counihanovoj metodi, prema [37] .....	27
Sl. 3.4: Barijere .....	28
Sl. 3.5: Profil intenziteta turbulencije nizvodno od generatora vrtloga, prema [20] i [38] .....	29
Sl. 3.6: Raspored objekata u mjernoj sekciji zračnog tunela .....	30
Sl. 3.7: Generator vrtloga .....	31

Sl. 3.8: Dimenzije LEGO kocke .....	31
Sl. 3.9: Visina elemenata hrapavosti.....	32
Sl. 3.10: Gustoća podne hrapavosti 1 (2.78%).....	32
Sl. 3.11: Gustoća podne hrapavosti 2 (1.39%).....	33
Sl. 3.12: Pogled na mjernu sekciju.....	33
Sl. 4.1: Mjerna mjesta .....	37
Sl. 4.2: Mjerna mjesta .....	38
Sl. 4.3: Mjerenje i obrada mjernih podataka.....	41
Sl. 4.4: Razlike tlaka u odnosu na mjerno mjesto 18 pri različitim nagibima stropa mjerne sekcije zračnog tunela .....	43
Sl. 4.5: Razvoj graničnog sloja duž mjerne sekcije zračnog tunela.....	45
Sl. 4.6: Profili osrednjenih vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru uz varijacije visine barijere i tipa podne hrapavosti (visina ispupčenja na barijeri = 41 mm) .....	46
Sl. 4.7: Mjerni rezultati uz varijacije visine barijere pri konstantnoj podnoj hrapavosti R4 ( visina ispupčenja na barijeri = 41 mm) .....	47
Sl. 4.8: Mjerni rezultati uz varijacije visine ispupčenja na barijeri pri konstantnoj podnoj hrapavosti R4 (visina barijere = 107 mm) .....	48
Sl. 4.9: Utjecaj mjerne pozicije u odnosu na elemente podne hrapavosti na rezultate mjerenja .....	49
Sl. 4.10: Spektar kinetičke energije turbulencije na visini 30 m .....	50
Sl. 4.11: Spektar kinetičke energije turbulencije na visini 100 m .....	51
Sl. A1: Nacrt barijere .....	62
Sl. A2: Nacrt generatora vrtloga .....	63
Sl. A3: Nacrt rebra .....	64
Sl. A4: Nacrt stražnje strane generatora vrtloga .....	65
Sl. B1: Primjer datoteke <b>ime_1</b> .....	69
Sl. C1: Barijera 1, podna hrapavost R1, brzina 8 m/s (regulacija brzine korištenjem hidrometrijskog krila), stativ, sonda zaokrenuta za 90°, x = 0 mm, y = 0 mm .....	70
Sl. C2: Barijera 1, podna hrapavost R1, brzina 8 m/s (regulacija brzine korištenjem hidrometrijskog krila), suport, sonda zaokrenuta za 90°, x = 0 mm, y = 0 mm....	71
Sl. C3: Barijera 1, podna hrapavost R1, brzina 12 m/s (regulacija brzine korištenjem hidrometrijskog krila), suport, sonda zaokrenuta za 90°, x = 0 mm, y = 0 mm....	72
Sl. C4: Barijera 1, podna hrapavost R1, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 360 \text{ min}^{-1}$ ), suport, sonda zaokrenuta za 90°, x = 0 mm, y = 0 mm.....	73

Sl. C5: Barijera 2, podna hrapavost R1, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, sonda zaokrenuta za $90^\circ$ , $x = 0 \text{ mm}$ , $y = 0 \text{ mm}$ .....	74
Sl. C6: Barijera 3, podna hrapavost R1, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, sonda zaokrenuta za $90^\circ$ , $x = 0 \text{ mm}$ , $y = 0 \text{ mm}$ .....	75
Sl. C7: Barijera 3, podna hrapavost R1, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, $x = 0 \text{ mm}$ , $y = 0 \text{ mm}$ .....	76
Sl. C8: Barijera 1, podna hrapavost R2, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, $x = 0 \text{ mm}$ , $y = 0 \text{ mm}$ .....	77
Sl. C9: Barijera 1, podna hrapavost R3, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, $x = 0 \text{ mm}$ , $y = 0 \text{ mm}$ .....	78
Sl. C10: Barijera 3, podna hrapavost R3, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, $x = 0 \text{ mm}$ , $y = 0 \text{ mm}$ .....	79
Sl. C11: Barijera 2, podna hrapavost R3, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, $x = 0 \text{ mm}$ , $y = 0 \text{ mm}$ .....	80
Sl. C12: Barijera 1, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, $x = 0 \text{ mm}$ , $y = 0 \text{ mm}$ .....	81
Sl. C13: Barijera 3, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, $x = 0 \text{ mm}$ , $y = 0 \text{ mm}$ .....	82
Sl. C14: Barijera 4, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, $x = 0 \text{ mm}$ , $y = 0 \text{ mm}$ .....	83
Sl. C15: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, $x = 0 \text{ mm}$ , $y = 0 \text{ mm}$ .....	84
Sl. C16: Barijera 6, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, $x = 0 \text{ mm}$ , $y = 0 \text{ mm}$ .....	85
Sl. C17: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, $x = -1000 \text{ mm}$ , $y = 0 \text{ mm}$ .....	86
Sl. C18: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, $x = 0 \text{ mm}$ , $y = 500 \text{ mm}$ .....	87
Sl. C19: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, $x = 0 \text{ mm}$ , $y = -500 \text{ mm}$ .....	88
Sl. C20: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, $x = 1000 \text{ mm}$ , $y = 0 \text{ mm}$ .....	89
Sl. C21: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, $x = 2000 \text{ mm}$ , $y = 0 \text{ mm}$ .....	90

Sl. C22: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; n = 400 min <sup>-1</sup> ), suport, x = 3000 mm, y = 0 mm.....	91
Sl. C23: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; n = 400 min <sup>-1</sup> ), suport, x = 0 mm, y = 10 mm.....	92
Sl. C24: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; n = 400 min <sup>-1</sup> ), suport, x = 0 mm, y = 55 mm.....	93
Sl. C25: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; n = 400 min <sup>-1</sup> ), suport, x = 0 mm, y = -40 mm.....	94
Sl. C26: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; n = 400 min <sup>-1</sup> ), suport, x = 0 mm, y = -240 mm.....	95
Sl. C27: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; n = 400 min <sup>-1</sup> ), suport, x = -2000 mm, y = 0 mm.....	96
Sl. C28: Barijera 7, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; n = 400 min <sup>-1</sup> ), suport, x = 0 mm, y = 0 mm.....	97
Sl. C29: Barijera 8, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; n = 400 min <sup>-1</sup> ), suport, x = 0 mm, y = 0 mm.....	98
Sl. C30: Barijera 9, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; n = 400 min <sup>-1</sup> ), suport, x = 0 mm, y = 0 mm.....	99
Sl. C31: Barijera 10, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; n = 400 min <sup>-1</sup> ), suport, x = 0 mm, y = 0 mm.....	100
Sl. C32: Barijera 11, podna hrapavost R4, brzina $\approx 12$ m/s (regulacija broja okretaja; n = 400 min <sup>-1</sup> ), suport, x = 0 mm, y = 0 mm.....	101
Sl. C33: Promjena mjernih vrijednosti duž y osi uz x = 0 mm i z = 100 mm .....	102

## Popis tablica

Tablica 2.1: Vrijednosti parametra $z_0$ (m) .....	7
Tablica 2.2: Karakteristične vrijednosti duljine hrapavosti i debljine istisnuća , prema [16] .....	8
Tablica 3.1: Visina stropa mjerne sekcije zračnog tunela kod pojedinih ručica uz konstantni kut nagiba stropa mjerne sekcije zračnog tunela $\gamma$ .....	26
Tablica 3.2: Dimenzije generatora vrtloga .....	31
Tablica 3.3: Podne hrapavosti .....	32
Tablica 4.1: Mjerna mjesta uz $\delta = 1000$ mm .....	36
Tablica 4.2: Pregled izvršenih mjerenja .....	39
Tablica A1: Dimenzije generatora vrtloga (mm) .....	61
Tablica A2: Dimenzije rebara .....	66
Tablica B1: Kalibracija sonde za mjerenje tlaka .....	67
Tablica B2: Razlike tlaka između pojedinih točaka i točke 18 pri različitim nagibima stropa mjerne sekcije zračnog tunela (Pa) .....	68

## Popis oznaka i mjernih jedinica

$a$	$[-]$	koeficijent raspodjele mjernih mjesta po visini
$a$	$[m^2/s]$	koeficijent prijenosa topline
$b$	$[m]$	širina
$b_G$	$[m]$	širina generatora vrtloga
$c_p$	$[J/kgK]$	specifični toplinski kapacitet
$d$	$[m]$	debljina istisnuća
$f$	$[rad/s]$	Coriolisov parametar
$f$	$[1/s]$	frekvencija
$f_m$	$[1/s]$	frekvencija pri kojoj $S_u$ postiže maksimalnu vrijednost
$g$	$[m/s^2]$	gravitaciono ubrzanje
$h$	$[m]$	visina objekta
$h_G$	$[m]$	visina generatora vrtloga
$\vec{k}$	$[-]$	jedinični vektor (okomit na površinu Zemlje, usmjeren prema gore)
$k_w$	$[1/m]$	valni broj pojave
$l_G$	$[m]$	duljina generatora vrtloga
$n$	$[1/s]$	frekvencija
$n$	$[1/min]$	broj okretaja
$p$	$[Pa]$	tlak
$\Delta p$	$[Pa]$	razlika tlaka
$t$	$[s]$	vrijeme
$t_b$	$[s]$	referentno vrijeme
$\bar{u}$	$[m/s]$	osrednjena vrijednost brzine u x smjeru
$u, v, w$	$[m/s]$	apsolutne vrijednosti brzine u x, y i z smjeru
$u', v', w'$	$[m/s]$	fluktuirajuće vrijednosti brzine u x, y i z smjeru
$u_{3600}$	$[m/s]$	osrednjena vrijednost brzine u x smjeru uz vrijeme osrednjavanja $t = 3600$ s
$\bar{u}_\delta$	$[m/s]$	osrednjena vrijednost brzine u x smjeru na visini $z = H_\delta$
$\bar{u}_z$	$[m/s]$	osrednjena vrijednost brzine u x smjeru na visini $z$
$\bar{u}_{ref}$	$[m/s]$	osrednjena vrijednost brzine u x smjeru na referentnoj visini
$u_\tau$	$[m/s]$	brzina trenja
$\bar{u}_z$	$[m/s]$	osrednjena vrijednost brzine u x smjeru na visini $z$
$\overline{u'v'}, \overline{v'w'} \text{ i } \overline{u'w'}$	$[m^2/s^2]$	korelacije
$x$	$[-]$	uzdužna os koordinatnog sustava
$y$	$[-]$	poprečna os koordinatnog sustava
$z$	$[-]$	vertikalna os koordinatnog sustava
$z_0$	$[m]$	duljina hrapavosti

$z_b$	[m]	referentna visina
$z_{ref}$	[m]	referentna visina
$z_e$	[m]	minimalna visina
$z_{0m}$	[m]	duljina hrapavosti na modelu
$z_{0p}$	[m]	duljina hrapavosti na prototipu
$z_{n+1}$	[m]	visina mjernog mjesta n+1
$z_n$	[m]	visina mjernog mjesta n
$z_N$	[m]	visina najvišeg mjernog mjesta (mj. mjesto N)
$z_1$	[m]	visina najnižeg mjernog mjesta (mj. mjesto 1)
$A_K$	[m <sup>2</sup> ]	površina poprečnog presjeka mjerne sekcije zračnog tunela
$A_M$	[m <sup>2</sup> ]	projekcija nastrojane površine modela
$Ec$	[-]	Eckertov broj
$F_c$	[N]	Coriolisova sila
$F_R$	[N]	sila trenja
$F_p$	[N]	sila uslijed polja tlaka atmosfere
$Gr$	[-]	Grashofov broj
$I_u, I_v, I_w$	[-]	intenzitet turbulencije u x, y i z smjeru
$Je$	[-]	Jensenov broj
$L$	[m]	karakteristična dimenzija objekta za promatrani eksperiment
$L_b$	[m]	referentna duljina
$L_{u,x}, L_{u,y}, L_{u,z}$	[m]	duljinska mjera u komponente turbulencije u x, y i z smjeru
$M$	[-]	mjerilo
$N$	[-]	broj mjernih mjesta
$Pr$	[-]	Prandtlov broj
$Re$	[-]	Reynoldsov broj
$Re_{model}$	[-]	Reynoldsov broj na modelu
$Re_{prototip}$	[-]	Reynoldsov broj na prototipu
$Re_R$	[-]	Reynoldsov broj definiran s duljinom hrapavosti $z_0$
$Ro$	[-]	Rossbyev broj
$S$	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	kinetička energija turbulencije
$S_u$	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	kinetička energija turbulencije u x smjeru
$St$	[-]	Strouhalov broj
$T$	[°K]	temperatura
$T_b$	[°K]	referentna temperatura
$\Delta T$	[°K]	razlika temperatura
$\Delta T_b$	[°K]	referentna razlika temperatura
$U$	[V]	napon

$U_{\text{bez}}$	[m/s]	osrednjena vrijednost brzine u x smjeru na referentnoj visini
$\vec{V}$	[-]	bezdimenzionalni vektor brzine
$V_b$	[m/s]	referentna brzina
$V_g$	[m/s]	stupanj začepljenosti ("blockage") mjerne sekcije zračnog tunela
$V_\infty$	[m/s]	brzina slobodne struje zraka ( $z \geq \delta$ )
$Z_b$	[m]	referentna visina
$\alpha$	[-]	eksponent zakona potencije
$\alpha_m$	[-]	eksponent zakona potencije na modelu
$\alpha_p$	[-]	eksponent zakona potencije na prototipu
$\alpha_t$	[-]	ekstremna vrijednost eksponenta zakona potencije
$\alpha_{3600}$	[-]	srednja vrijednost eksponenta zakona potencije
$\beta$	[°]	kut između vektora brzine i izobara
$\gamma$	[°]	kut nagiba stropa mjerne sekcije zračnog tunela
$\delta$	[m]	debljina graničnog sloja
$\delta_m$	[m]	debljina graničnog sloja na modelu
$\delta_p$	[m]	debljina graničnog sloja na prototipu
$\kappa$	[-]	Kármánova konstanta
$\lambda_R$	[-]	koeficijent trenja
$\mu$	[kg/ms]	koeficijent dinamičkog viskoziteta
$\varphi$	[-]	disperzija energije po jedinici volumena ili mase
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	koeficijent kinematičkog viskoziteta
$\nu_{\text{zrak}}$	[m <sup>2</sup> /s]	koeficijent kinematičkog viskoziteta zraka
$\nu_{\text{model}}$	[m <sup>2</sup> /s]	koeficijent kinematičkog viskoziteta zraka na modelu
$\nu_{\text{prototip}}$	[m <sup>2</sup> /s]	koeficijent kinematičkog viskoziteta zraka na prototipu
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	gustoća zraka
$\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$	[m/s]	standardna devijacija brzine u x, y i z smjeru
$\tau$	[N/m <sup>2</sup> ]	tangencijalno naprezanje
$\tau_0$	[N/m <sup>2</sup> ]	tangencijalno naprezanje uz podlogu
$\eta_S$	[m]	mjerilo duljine Kolmogorova
$\Phi$	[°]	zemljopisna širina
$\Omega$	[rad/s]	kutna brzina Zemlje



## 1. Uvod

U posljednje vrijeme postoji sve veći interes za rješavanjem specifičnih problema koji nastaju uslijed gibanja atmosfere u blizini Zemljine površine. Velika većina prirodnih procesa koji su ključni za opstanak i razvoj života na Zemlji se odvija unutar atmosferskog graničnog sloja, kao i većina izmjene topline, mase i momenta količine gibanja između Zemljine površine i atmosfere.

Struktura Zemljinog atmosferskog graničnog sloja je vrlo složena. Gibanje zraka uglavnom je turbulentno, uzrokovano rotacijom Zemlje, utjecajem uzgona, površinskim silama otpora i topografijom terena.

Ispitivanje utjecaja vjetra na građevinske objekte se može vršiti eksperimentalnim i numeričkim putem. Kada postojeći modeli numeričke simulacije ne daju zadovoljavajuće rezultate i kad se postojeće norme ne mogu primijeniti na zadani model nužno je provesti eksperimentalna ispitivanja u zračnom tunelu.

Modeliranje atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu je važno s aspekta predviđanja opterećenja na građevinske objekte uslijed utjecaja vjetra, te difuzije topline i mase, kao i u smislu boljeg razumijevanja strukture atmosferskog graničnog sloja. Kad se jednom u zračnom tunelu generira granični sloj koji po strukturi odgovara atmosferskom graničnom sloju, tada se uvjeti strujanja u laboratorijskim uvjetima mogu kontinuirano mijenjati i mogu se provoditi precizna mjerenja u svrhu provjere postojećih i razvijanja novih teoretskih modela. Pri tome se upotrebljavaju posebno konstruirani zračni tuneli, koji su namijenjeni isključivo za generiranje graničnog sloja i modeliranje pojava iz atmosfere.

Postoji nekoliko metoda modeliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu. Counihan [1] koristi sustav sastavljen od barijere, generatora vrtloga i podne hrapavosti pri stimuliranju rasta graničnog sloja u mjernoj sekciji zračnog tunela u mjerilima 1:250 do 1:500 [2]. Pri svojim eksperimentima varira visinu nazubljene barijere, s ciljem modeliranja nekoliko različitih tipova graničnog sloja. Ovu je metodu kasnije unaprijedio Robins [3]. Mrežu, barijeru i podnu hrapavost primjenjuje Cook [4] pri simulaciji donjeg dijela neutralnog atmosferskog graničnog sloja u mjerilu 1:250. Metoda upuhavanja zraka, prema [5] i [6], kao i primjena više zračnih turbopuhala, prema [7], se koriste pri generiranju graničnog sloja u mjerilima nepovoljnim za ispitivanje opterećenja na samostojećim obiteljskim stambenim objektima. Jednostavna i efikasna metoda modeliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu uključuje upotrebu dvodimenzionalnih generatora vrtloga ili klinova koji pridonose formiranju turbulentnog graničnog sloja na ulazu u mjernu sekciju zračnog tunela. Na strukturu unutarnjeg turbulentnog graničnog sloja bitno utječe podna hrapavost, odgovarajuće visine i gustoće raspodjele. Ova metoda, prema [8] i [9], se koristi pri modeliranju cijelog neutralnog atmosferskog graničnog sloja. Reynoldsova naprezanja i intenziteti turbulencije unutar modeliranog graničnog sloja pri Lloydovim eksperimentima [10] su niži u usporedbi s mjernim rezultatima iz prirode, a pri češće korištenoj Templinovoj metodi [11] je iznos kinetičke energije

turbulencije nedovoljno visok, a javljaju se i znatna odstupanja unutar profila osrednjenih vrijednosti brzine.

U radu je potrebno modelirati atmosferski granični sloj u zračnom tunelu za sljedeće uvjete:

- debljina graničnog sloja	$\delta = 500 \text{ m}$
- duljina hrapavosti	$z_0 = 0.15 \text{ m}$
- debljina istisnuća	$d = 10 \text{ m}$
- eksponent zakona potencije	$\alpha = 0.22$
- mjerilo	1:500

Za modeliranje atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu koristi se metoda Counihan, pri čemu se za generiranje željene strukture toka upotrebljava barijera, generatori vrtloga i podna hrapavost.

Prilikom mjerenja variraju se visina i oblik barijere, te visina i gustoća razdiobe podne hrapavosti.

Mjerenja se vrše u jednom poprečnom presjeku radne sekcije zračnog tunela. Mjerne veličine su vektor brzine i intenzitet turbulencije, te dvojne korelacije (Reynoldsova naprezanja).

Mjerenja su realizirana u zračnom tunelu zatvorene radne sekcije četvrtastog poprečnog presjeka (visina 1.8 m; širina 2.7 m; duljina 20 m), Katedre za Mehaniku fluida Tehničkog Sveučilišta u Münchenu.

## 2. Osnove

### 2.1. Atmosferski granični sloj

Vjetar predstavlja gibanje zraka u atmosferi.

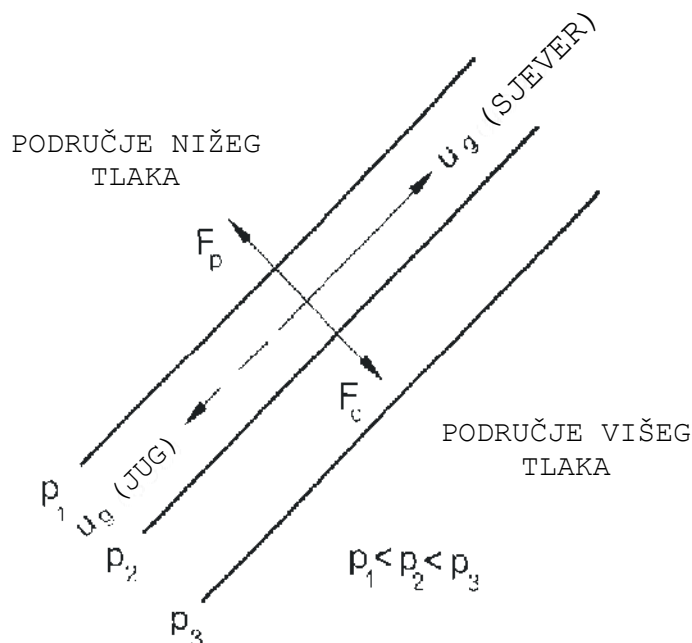
Na strujanje zraka u donjim dijelovima atmosfere utječe sila viskoznog trenja koja se javlja između Zemljine površine i struje zraka. Sloj atmosfere u kojem brzina strujanja zraka raste od nule do neke granične vrijednosti naziva se atmosferski granični sloj.

Iznad atmosferskog graničnog sloja se nalazi sloj u kojemu sila viskoznog trenja nema bitnog utjecaja na strujanje zraka, a na svaku česticu zraka djeluju dvije sile:  $F_p$  uslijed polja tlaka u atmosferi i Coriolisova sila  $F_c$  kao posljedica rotacije Zemlje.

Coriolisova sila djeluje uvijek u smjeru okomitom u odnosu na vektor brzine  $u_g$ .

Pošto se vertikalna komponenta brzine struje zraka može zanemariti, opravdana je pretpostavka da je strujanje u većoj mjeri paralelno s površinom Zemlje. Također su i izobare vrlo malo zakrivljene, tj. mogu biti promatrane kao pravci, pa se ne javljaju ubrzanja i sile.

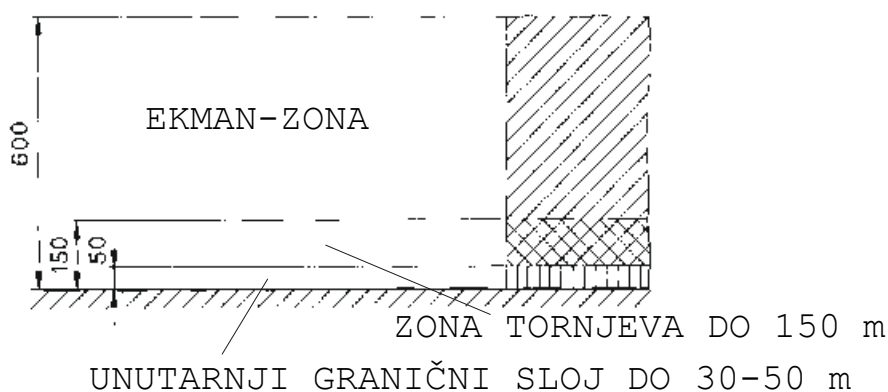
Kao posljedica toga se sila  $F_p$  i Coriolisova sila  $F_c$  nalaze u ravnoteži, Sl. 2.1. Smjer brzine  $u_g$  je paralelan sa smjerom izobara i okomit na smjer djelovanja obiju sila.



Sl. 2.1: Coriolisova sila  $F_c$  i sila  $F_p$  uslijed polja tlaka

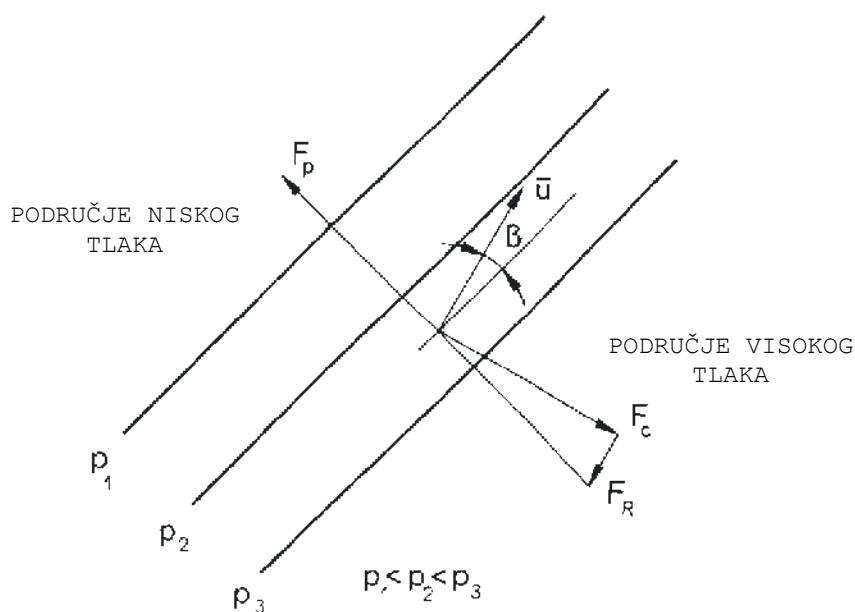
U području aerodinamike zgrada proučava se isključivo atmosferski granični sloj, jer se izuzev rijetkih iznimki, svi građevinski objekti nalaze unutar tog sloja. Radi se o turbulentnom graničnom sloju, čije su karakteristike određene s brzinom strujanja zraka i hrapavosti Zemljine površine. Kao srednja debljina graničnog sloja, kako iznad urbanog, tako i iznad ruralnog pejzaža, se može uzeti 600 m, prema [12], iako su istraživanja različitih autora dala različite rezultate.

Atmosferski granični sloj se dijeli na Ekman-zonu i unutarnji granični sloj, Sl. 2.2.



Sl. 2.2: Atmosferski granični sloj

Donji dio Ekman-zone i unutarnji granični sloj se također označavaju kao zona tornjeva, koja se prostire do visine 150 m iznad površine tla. U Ekman-zoni djeluju sile  $F_p$ , Coriolisova sila  $F_c$  i sila trenja  $F_R$ . Ubrzanje se u ovom sloju može zanemariti, pa se ove tri sile nalaze u stanju ravnoteže. Smjer struje zraka se ne podudara sa izobarama, već s njima tvori kut  $\beta$ , Sl. 2.3.

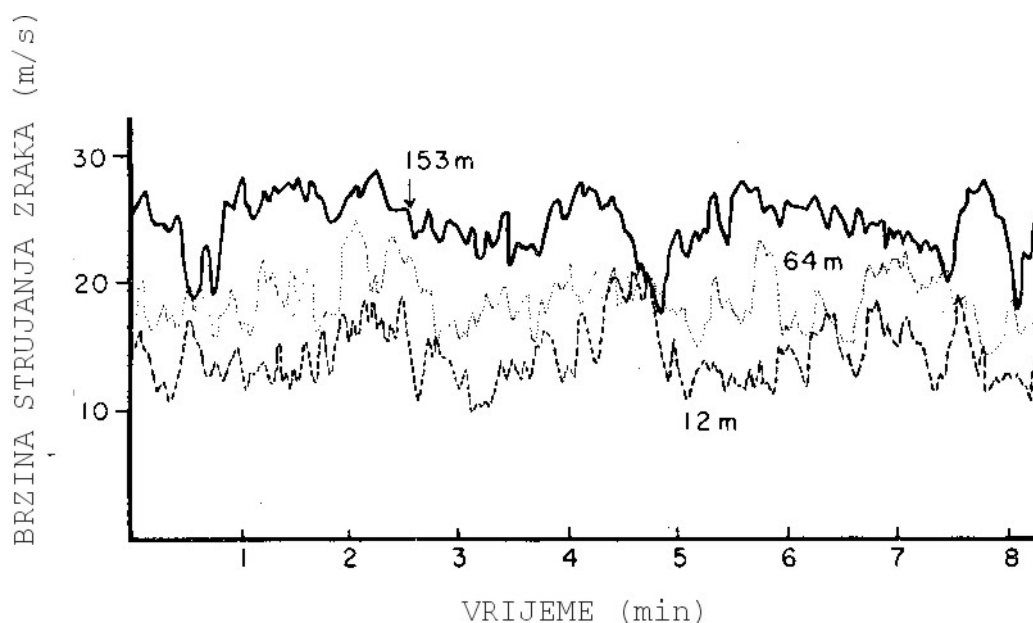
Sl. 2.3: Coriolisova sila  $F_c$ , sila  $F_p$  uslijed polja tlaka i sila trenja  $F_R$ 

Kut  $\beta$  raste sa smanjenjem udaljenosti od tla i može pri većim brzinama strujanja u blizini tla iznositi i do  $40^\circ$ . Uzima se da je smjer struje zraka u unutarnjem graničnom sloju (30-50 m visine) konstantan, a rotacija Zemlje nema utjecaja. Reynoldsovo tangencijalno naprezanje u unutarnjem graničnom sloju se ne mijenja po iznosu s visinom, ukoliko je podna hrapavost jednoliko raspodijeljena.

Pri većim brzinama strujanja ( $u_{3600} \geq 10 \text{ m/s}$ ) se smjer struje zraka ne mijenja do visine 150 m iznad površine Zemlje, iako rotacija Zemlje na ovoj visini već može imati utjecaja. Usljed toga se mnoge zakonitosti koje vrijede unutar unutarnjeg graničnog sloja mogu primijeniti na kompletnu zonu tornjeva. Turbulentna gibanja uslijed razlika u temperaturi atmosfere se mogu zanemariti.

### 2.1.1. Profil osrednjenih brzina u aksijalnom smjeru

Strujanje u atmosferskom graničnom sloju je turbulentno, tj. smjer i iznos brzine se mijenjaju s vremenom. Rezultat mjerenja brzine u prirodi unutar atmosferskog



Sl. 2.4: Rezultat mjerenja brzine u prirodi

graničnog sloja prikazan je na Sl. 2.4.

Pri većim brzinama strujanja iznos osrednjene brzine ovisi o visini iznad tla, vremenskom periodu po kojem se vrši osrednjavanje i podnoj hrapavosti (struktura tla). Podna hrapavost se opisuje aerodinamičkim parametrom  $z_0$ , koji odgovara karakterističnoj duljini elemenata turbulencije najvišeg energetskog nivoa u blizini tla. Duljina hrapavosti  $z_0$  je određena visinom i gustoćom raspodjele građevinskih objekata. S povećanjem hrapavosti podloge, tj. s povišenjem pojedinih građevina i sličnih prepreka, smanjuje se porast osrednjene vrijednosti brzine s porastom visine iznad tla. Različite vrijednosti parametra  $z_0$  odgovaraju različitim tipovima tla, Tablica 2.1.

Pri strujanju zraka nastaje tangencijalno naprezanje; kako između različitih slojeva zraka, tako i između struje zraka i podloge. U uskom području uz podlogu se uvijek nalazi vrlo tanki viskozni podsloj u kojem su iznosi intenziteta turbulencije zanemarivi, a tangencijalno naprezanje ne doseže do podloge. Iz zakona sličnosti slijedi zakonitost raspodjele brzine u graničnom sloju

$$\frac{\bar{u}}{u_\tau} = f\left(\frac{zu_\tau}{\nu}\right), \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}, \quad (2.1)$$

koja je potvrđena eksperimentom, prema [13]. Pritom se tangencijalno naprezanje uz podlogu definira kao

$$\tau_0 = \mu \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)_{z=0}. \quad (2.2)$$

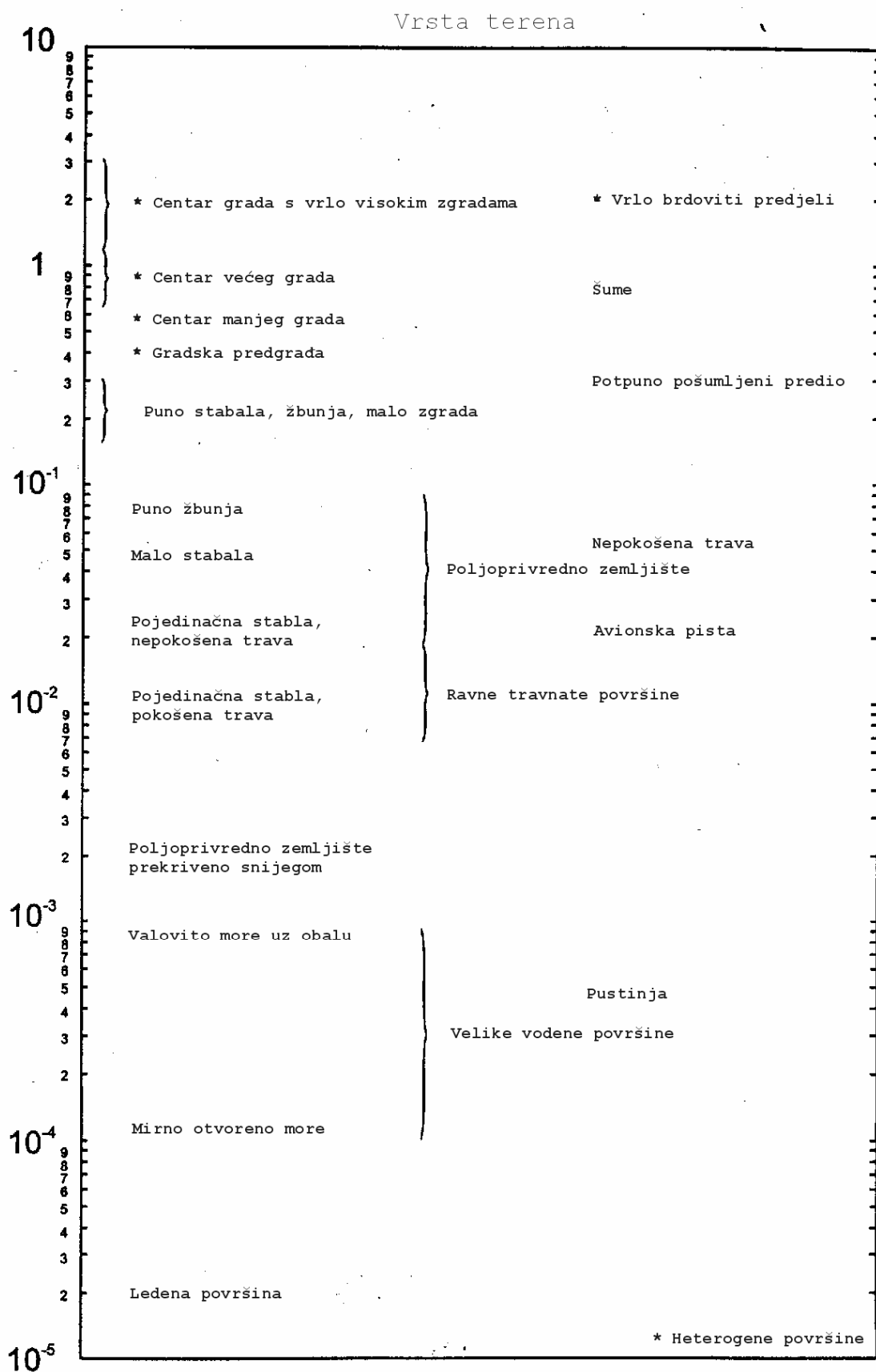
Veličina  $u_\tau$  se definira kao brzina trenja, koja fizikalno ne predstavlja brzinu, ali je ovaj naziv već duboko uvriježen u praksi, pošto izraz  $\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$  ima dimenziju brzine.

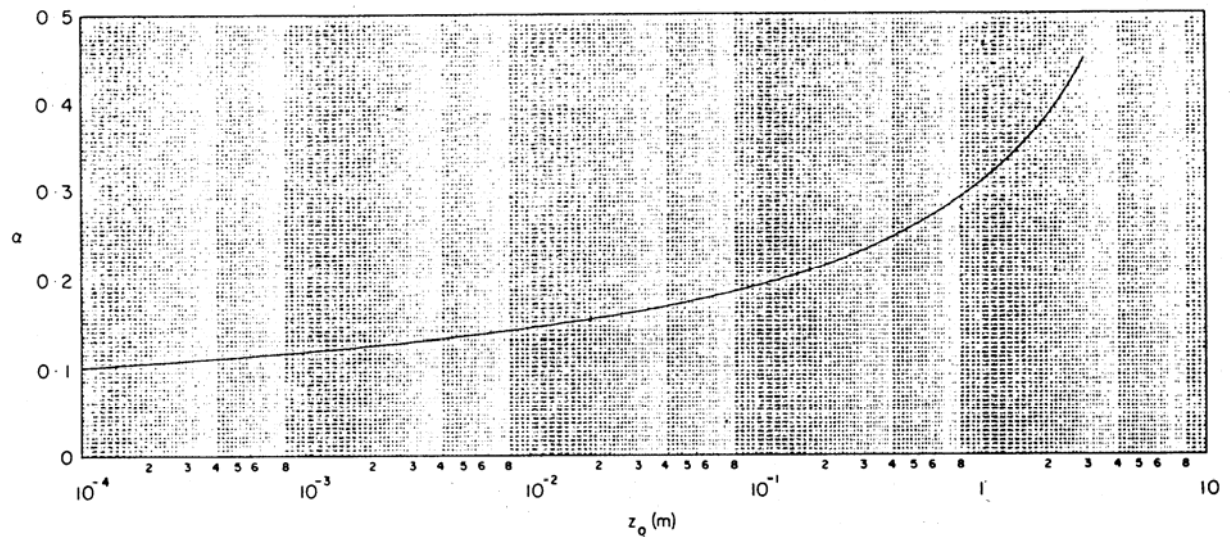
Uslijed strujanja zraka iznad dovoljno duge ravne podloge (dulje od 5 – 10 km), uz homogenu strukturu hrapavosti, uspostavlja se ravnotežni granični sloj. Vertikalna raspodjela osrednjene brzine u aksijalnom smjeru unutar graničnog sloja se definira zakonom potencije oblika

$$\frac{\bar{u}_z}{\bar{u}_{\text{ref}}} = \left( \frac{z - d}{z_{\text{ref}} - d} \right)^\alpha = \left( \frac{\tilde{z}}{\tilde{z}_{\text{ref}}} \right)^\alpha. \quad (2.3)$$

Eksponent zakona potencije  $\alpha$  ovisi o površinskoj hrapavosti podloge, stabilnosti atmosfere i vremenskom periodu unutar kojeg se vrši proračun osrednjene vrijednosti brzine. Ukoliko je atmosfera neutralno stratificirana  $\left( \frac{\partial T}{\partial z} \leq \frac{1^\circ}{100\text{m}} \right)$ , vrijednosti eksponenta zakona potencije  $\alpha$  se mogu očitati iz dijagrama prikazanog na Sl. 2.5 za vrijednosti duljine hrapavosti  $z_0$  iz Tablice 2.1.

Strujanje zraka među zgradama u blizini tla je vrlo složeno, te je smjer i iznos brzine u ovom području vrlo teško odrediti. Stoga se zakon potencije primjenjuje tek u području iznad visine zgrada smještenih na podlozi. Ova se visina naziva debljina istisnuća i označava  $d$ . Točno određivanje debljine istisnuća nije moguće, ali se može prema [14] prihvatiti da je debljina istisnuća jednaka visini okolnih zgrada ( $d = h$ ). U literaturi [15] se također navodi mogućnost računanja visine istisnuća kao 75% visine okolnih zgrada ( $d = 0.75h$ ).

Tablica 2.1: Vrijednosti parametra  $z_0$  (m)

Sl. 2.5: Ovisnost eksponenta zakona potencije  $\alpha$  o duljini hrapavosti  $z_0$ 

U blizini tla do ca. 100 m visine profil osrednjenih brzina u aksijalnom smjeru može se također definirati logaritamskim zakonom oblika

$$\frac{\bar{u}_z}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right), \quad (2.4)$$

odnosno

$$\frac{\bar{u}_z}{\bar{u}_{\text{ref}}} = \frac{\ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right)}{\ln \left( \frac{z_{\text{ref}}-d}{z_0} \right)}, \quad (2.5)$$

Opis površine tla	$z_0$ (m)	$d$ (m)
Centar grada Šuma	0.7	15-25
Manji gradovi Predgrađa većih gradova Puno stabala	0.3	5-10
Rubovi manjih gradova Sela Pejzaž s puno živica, malo stabala i kuća	0.1	0-2
Poljoprivredno zemljište s malo stabala, živica i rijetkim kućama	0.03	0
Livada s malo stabala	0.01	0
Ravna livada s kratkom travom bez prepreka Avionska pista Nemirno more	0.003	0
Poljoprivredno zemljište prekriveno snijegom Pustinja Površina jezera za vrijeme oluje	0.001	0

Tablica 2.2: Karakteristične vrijednosti duljine hrapavosti i debljine istisnuća, prema [16]



pri čemu se za standardnu vrijednost Kármánove konstante usvaja 0.4, dok rezultati eksperimenata u atmosferi daju bolje rezultate za vrijednost  $\kappa = 0.35$ , prema [17]. Konačni sud o iznosu ove konstante još nije donesen, prema [18].

Pri velikim se iznosima duljine hrapavosti ( $z_0 \geq 1$  m) javljaju veća odstupanja između osrednjenih vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru dobivenih zakonom potencije i onih dobivenim logaritamskim zakonom. Profil srednjih brzina primjenjuje se tek iznad određene minimalne visine u ovisnosti o podnoj hrapavosti, a uzima se da je u sloju ispod te minimalne visine brzina po smjeru i intenzitetu konstantna. Kao minimalna visina se preporučuje  $z_e = z - d = 6$  m, iako pojedini autori razmatraju 10 m kao minimalnu visinu, prema [19].

### 2.1.2. Intenzitet turbulencije

Intenzitet turbulencije je mjera iznosa fluktuirajuće komponente brzine normiranog s iznosom osrednjene brzine u aksijalnom smjeru na istoj visini. Uz fluktuiranje brzine struje zraka u aksijalnom smjeru javljaju se i fluktuacije u poprečnom i vertikalnom smjeru. Intenziteti turbulencije u različitim smjerovima imaju različite iznose, tj. turbulencija je unutar atmosferskog graničnog sloja anizotropna. Intenzitet turbulencije je po iznosu najveći u aksijalnom smjeru, a najmanji u vertikalnom smjeru. Iznosi intenziteta turbulencije u ovisnosti o visini iznad podloge za različite vrijednosti podne hrapavosti  $z_0$  prikazani su na Sl. 2.6.

Fluktuirajuća komponenta brzine struje zraka  $u'$  obuhvaćena je izrazom za standardnu devijaciju  $\sigma_u$

$$\sigma_u = \sqrt{u'u'}. \quad (2.6)$$

Izrazom za intenzitet turbulencije  $I_u$  se definira odnos fluktuirajuće komponente prema osrednjoj vrijednosti brzine struje zraka u aksijalnom smjeru

$$I_u = \frac{\sigma_u}{u_\tau} \frac{u_\tau}{V_\infty}, \quad (2.7)$$

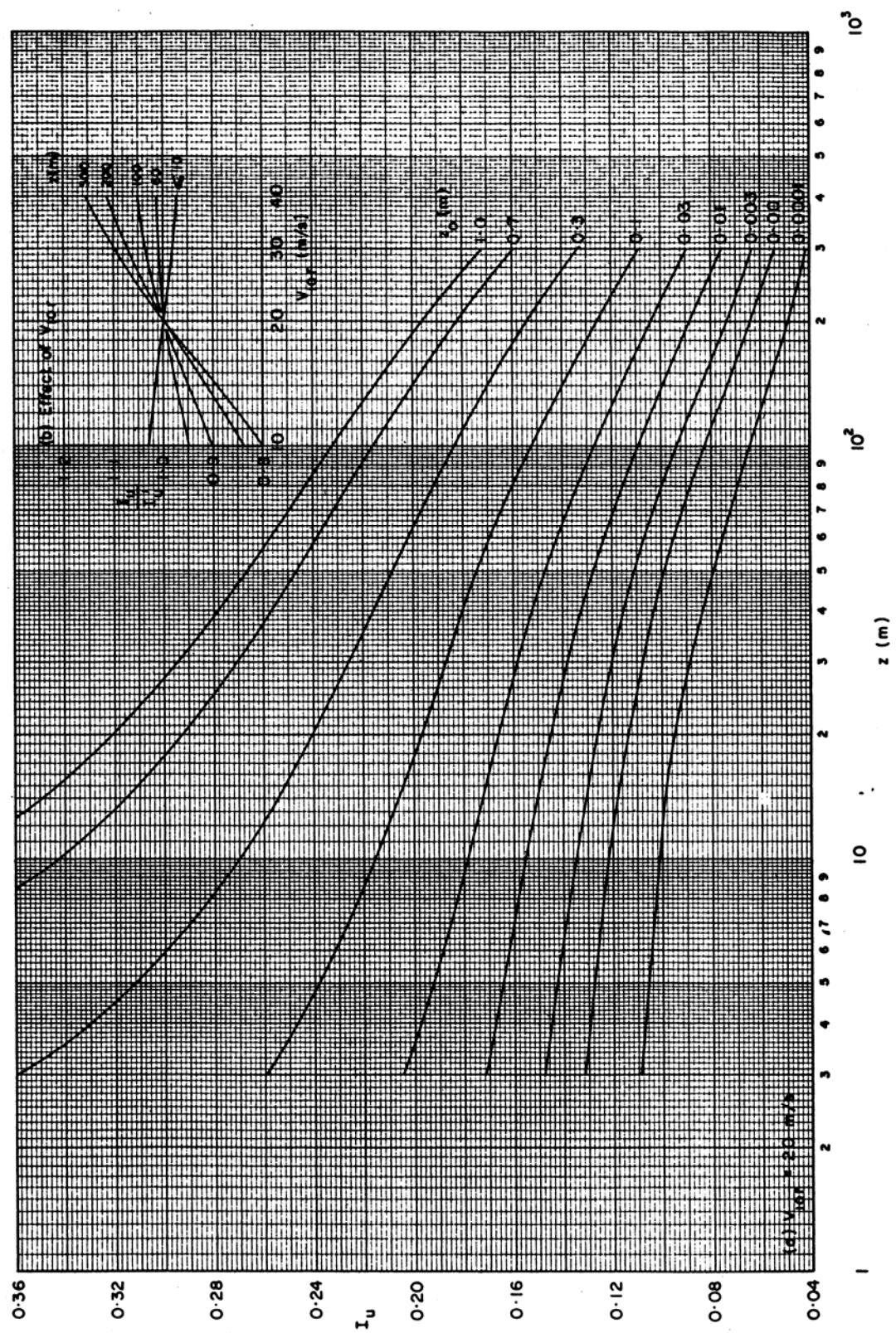
pri čemu je

$$\frac{\sigma_u}{u_\tau} = \frac{7.5\eta \left[ 0.538 + 0.09 \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \right]^p}{1 + 0.156 \ln \left( \frac{u_\tau}{fz_0} \right)}, \quad (2.8)$$

uz

$$\eta = 1 - 6f \frac{z}{u_\tau}, \quad (2.9)$$

$$p = \eta^{16}, \quad (2.10)$$



Sl. 2.6: Raspodjela intenziteta turbulencije struje zraka u prirodi

i

$$\frac{V_{\infty}}{u_{\tau}} = 2.5 \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) + 34.5f \frac{z}{u_{\tau}} \right]. \quad (2.11)$$

Coriolisov parametar definiran je izrazom  $f=2\Omega\sin\Phi$ .  $\Phi$  predstavlja zemljopisnu širinu na kojoj se vrše mjerenja,  $\Omega$  kutnu brzinu Zemlje ( $\Omega = 72.9 \cdot 10^{-6}$  rad/s), a  $V_{\infty}$  brzinu struje zraka izvan graničnog sloja.

Npr. za München vrijedi  $\Phi \cong 48.2^\circ$ , što daje  $f = 1.087 \cdot 10^{-4}$  rad/s.

Intenzitet turbulencije fluktuirajuće komponente brzine u poprečnom smjeru  $v'$  se definira kao

$$I_v = \frac{\sigma_v}{u_{\tau}} \frac{u_{\tau}}{V_{\infty}}, \quad (2.12)$$

a u vertikalnom smjeru  $w'$  kao

$$I_w = \frac{\sigma_w}{u_{\tau}} \frac{u_{\tau}}{V_{\infty}}. \quad (2.13)$$

Rezultati mjerenja iz prirode pri neutralnim atmosferskim uvjetima, pri čemu su istovremeno mjereni  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  i  $\sigma_w$ , pokazuju da su odnosi  $\frac{\sigma_v}{\sigma_u}$  i  $\frac{\sigma_w}{\sigma_u}$  u blizini tla konstantni, tj. prema [20] vrijedi

$$\frac{\sigma_v}{\sigma_u} = 1 - 0.22 \cos^4 \left( \frac{\pi z}{2 \delta} \right) \quad (2.14)$$

i

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_u} = 1 - 0.45 \cos^4 \left( \frac{\pi z}{2 \delta} \right), \quad (2.15)$$

pri čemu je

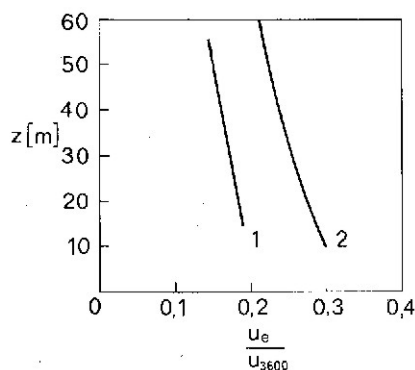
$$\delta = \frac{u_{\tau}}{6f}. \quad (2.16)$$

Prema [12] vrijedi

$$\frac{\sigma_v}{\sigma_u} = 0.73 \quad (2.17)$$

i

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_u} = 0.46. \quad (2.18)$$



Sl. 2.7: Promjena intenziteta turbulencije u aksijalnom smjeru s visinom za dvije različite podloge

Ovi odnosi vrijede na svim visinama unutar atmosferskog graničnog sloja za homogenu podlogu, tj. pri složenijim strukturama tla se javljaju velika odstupanja.

Profil intenziteta turbulencije za dvije različite podloge je prikazan na Sl. 2.7.

Mjerenja u prirodi, prema [21], pokazuju da vrijede slijedeći odnosi

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{u_\tau} = 2.1 \div 2.9, \quad (2.19)$$

$$\frac{\sqrt{v'^2}}{u_\tau} = 1.3 \div 2.6 \quad (2.20)$$

i

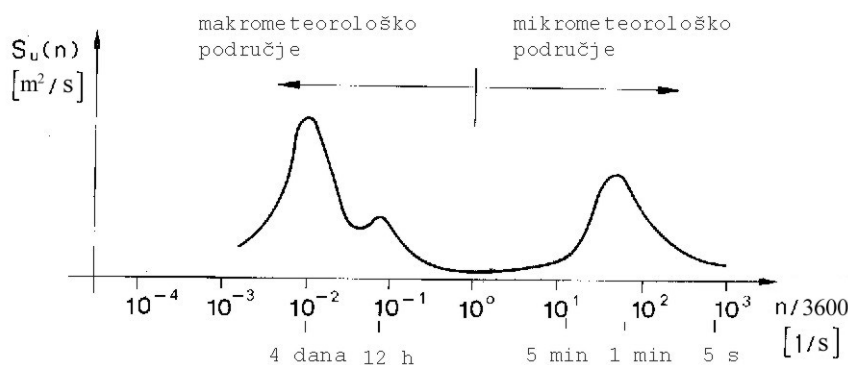
$$\frac{\sqrt{w'^2}}{u_\tau} = 1.25. \quad (2.21)$$

Rezultati mjerenja, prema [22], potvrđuju činjenicu da su vrijednosti intenziteta turbulencije ovisne o hrapavosti podloge i o visini iznad tla.

### 2.1.3. Spektar kinetičke energije turbulencije

Struktura struje zraka u nižim slojevima graničnog sloja oblikuje se pod utjecajem polja tlaka i karakteristika reljefa iznad kojeg se granični sloj oblikuje. Promjene uzrokovane promjenama u polju izobara su postupne, dok nagle promjene strukture podne hrapavosti izazivaju nagle turbulentne oscilacije. U praktičnoj primjeni proučava se najčešće spektar kinetičke energije turbulencije u x smjeru,

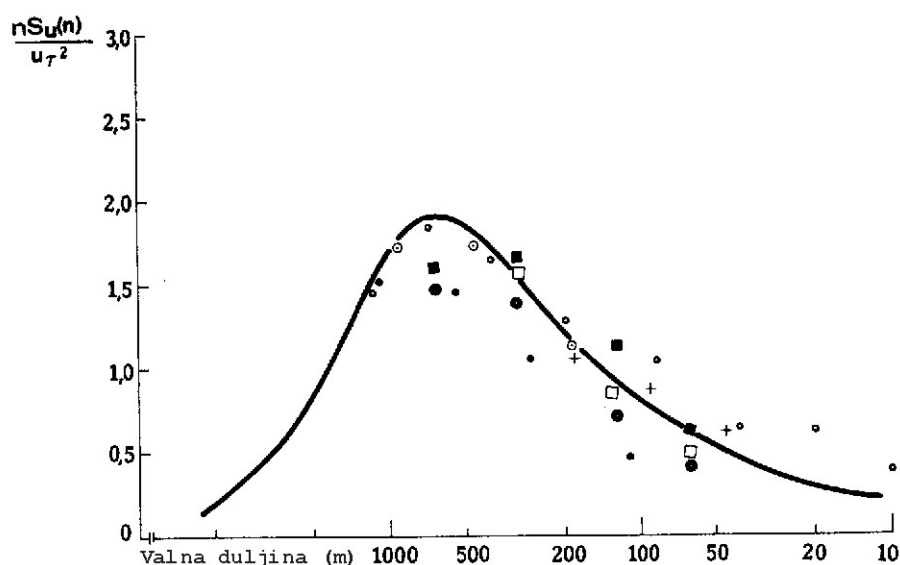
$$\overline{u'^2} = \int_0^\infty S_u(n) dn, \quad (2.22)$$



Sl. 2.8: Spektar kinetičke energije turbulencije u aksijalnom smjeru

pošto raspodjela kinetičke energije turbulencije u y i z smjeru nema bitno značenje u praktičnoj primjeni. Sl. 2.8 prikazuje karakterističnu raspodjelu kinetičke energije turbulencije u aksijalnom smjeru. Bitno se razlikuju dva područja, mikrometeorološko i makrometeorološko. Makrometeorološke pojave uzrokovane su atmosferskim poljima tlaka, a mikrometeorološke lokalnim promjenama reljefa. Maksimalne vrijednosti kinetičke energije turbulencije u aksijalnom smjeru obiju zona razdvojene su zonom ( $8 \text{ h} \div 10 \text{ min}$ ) vrlo niskih vrijednosti.

Prvi maksimum makrometeorološkog područja odgovara četverodnevnom vremenu trajanja izmjene polja visokog i niskog tlaka (ciklona i anticiklona), a druga, niža maksimalna vrijednost ocrta promjene u atmosferi koje nastaju uslijed izlaska i zalaska sunca. Maksimalna vrijednost kinetičke energije turbulencije u aksijalnom smjeru u mikrometeorološkom području odgovara turbulenciji koja nastaje uslijed utjecaja podne hrapavosti. U aerodinamici zgrada proučava se isključivo mikrometeorološko područje s posebnim težištem na području frekvencija oko maksimalne vrijednosti kinetičke energije turbulencije u aksijalnom smjeru, Sl. 2.9.



Sl. 2.9: Spektar kinetičke energije turbulencije u aksijalnom smjeru mikrometeorološkog područja; usporedba empirijske krivulje s mjernim vrijednostima, prema (68)

Pri određenoj brzini strujanja zraka dolazi uslijed utjecaja podne hrapavosti do nastajanja specifične strukture karakteristične za polje turbulencije, tzv. turbulentnih vrtloga određene veličine, koji se raspadaju na sve manje i manje elemente, te se konačno najmanji poznati elementi turbulencije (turbulentni vrtlozi promjera 1 mm) uslijed trenja pretvaraju u toplinu. Konstantno se održava kaskadni proces transporta energije između velikih i manjih elemenata turbulencije. Najveći turbulentni vrtlozi nisu pritom najbogatiji energijom; maksimum se nalazi pri nešto višim frekvencijama kod kojih su karakteristične turbulentne strukture nešto manje. Pri frekvencijama višim od onih kod kojih vrijednosti kinetičke energije turbulencije dosežu maksimalnu vrijednost se nalazi područje frekvencija u kojem inercijalne sile imaju dominantnu ulogu, pri čemu vrijedi zakon Kolmogorova,

$$S(n) \approx k_w^{-\frac{5}{3}}, \quad (2.23)$$

pri čemu  $k_w$  predstavlja valni broj pojave. U ovom području se energetski nivo smanjuje sa smanjenjem dimenzija elemenata turbulencije. Područje najviših frekvencija predstavlja tzv. zonu disipacije, odnosno zonu u kojoj dolazi do transformacije najsitnijih struktura turbulencije u toplinsku energiju. Zona disipacije se ne proučava u aerodinamici zgrada.

Nakon usporedbe teoretskih podloga s rezultatima iz prirode Pröpper [23] je ustvrdio da izraz Kolmogorova za raspodjelu kinetičke energije turbulencije u simuliranom atmosferskom graničnom sloju pokazuje vrlo dobru podudarnost s rezultatima mjerenja iz prirode

$$\frac{f \cdot S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \cdot X_u}{(1 + 70.78 \cdot X_u^2)^{\frac{5}{6}}}, \quad (2.24)$$

pri čemu

$$X_u = \frac{f \cdot L_{u,x}(z)}{\bar{u}(z)} \quad (2.25)$$

predstavlja bezdimenzionalnu frekvenciju, i

$$L_{u,x} = \frac{0.146 \cdot \bar{u}(z)}{f_m} \quad (2.26)$$

integralnu duljinsku mjeru turbulencije.  $f_m$  je frekvencija, pri kojoj izraz  $f \cdot S_u(f)$  postiže maksimalnu vrijednost, a određuje se mjerenjem.

#### 2.1.4. Reynoldsovo tangencijalno naprezanje

Na površini Zemlje nastaju između struje zraka i podloge sile trenja. Sile se u više slojeve atmosfere prenose posredstvom Reynoldsovog tangencijalnog naprezanja i izmjenom momenta količine gibanja. Reynoldsova naprezanja definiraju se  $u'v'$ ,  $v'w'$  i  $u'w'$  korelacijama i jednaka su nuli ukoliko je turbulencija izotropna, tj.

ukoliko su karakteristike strujanja neovisne o smjeru. Unutar atmosferskog graničnog sloja je strujanje anizotropno, a u praktičnoj primjeni se iznosi korelacija  $u'v'$  i  $v'w'$  mogu zanemariti, u skladu s rezultatima mjerenja iz prirode [20].

Reynoldsovo tangencijalno naprezanje se, prema [20], definira izrazom

$$\tau = -\overline{\rho u'w'} = \rho u_\tau^2 (1 - z/h)^2. \quad (2.27)$$

Do 300 m visine vrijedi, također prema [20],

$$\frac{-\overline{u'w'}}{\sigma_u \sigma_v} \approx \frac{u_\tau^2 (1 - 2z/h)}{\sigma_u (\sigma_w / \sigma_u) \sigma_u} = \frac{1 - 2z/h}{(\sigma_u / u_\tau)^2 (\sigma_w / \sigma_u)}, \quad (2.28)$$

pri čemu je  $\sigma_w / \sigma_u \approx 0.55$ , prema [20], a  $\sigma_u / u_\tau$  se definira izrazom (2.7), pod uvjetom da se atmosferski granični sloj nalazi u stanju ravnoteže.

## 2.2. Modeliranje atmosfere u zračnom tunelu

Realnu procjenu zbivanja u atmosferskom graničnom sloju moguće je dovoljno pouzdano analizirati modeliranjem atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu.

Točno modeliranje svih parametara atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu nije moguće. Zbog složenosti strukture atmosferskog graničnog sloja dopuštena je tijekom modeliranja u zračnom tunelu modifikacija određenih parametara.

### 2.2.1. Opći kriteriji modeliranja

Pri modeliranju atmosferskog strujanja mora čitav niz parametara kod modela i prototipa biti invarijantan. Ti su parametri bezdimenzionalni i sastavljeni su od sljedećih referentnih veličina:

- referentna brzina  $V_b$
- referentna duljina  $L_b$
- referentno vrijeme  $t_b$
- referentna temperatura  $T_b$
- referentna razlika temperatura  $\Delta T_b$

Polje strujanja se definira sljedećim bezdimenzionalnim značajkama:

Rosbyeva značajka ( $f$  = Coriolisov parametar) 
$$Ro = \frac{V_b}{L_b} f,$$

Reynoldsova značajka 
$$Re = \frac{V_b L_b}{\nu},$$

Strouhalova značajka

$$St = \frac{V_b}{L_b} t_b,$$

Grashofova značajka

$$Gr = \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \cdot \frac{gL_b^3}{\nu^2}$$

Eckertova značajka

$$Ec = \frac{\rho V_b^2}{c_p \Delta T_b},$$

Prandtlova značajka

$$Pr = \frac{\nu}{a}.$$

Sve ove značajke, uključujući također početne i rubne uvjete, bi kod modela i prototipa trebale biti jednake, što bi moglo biti ispunjeno samo u slučaju kada bi model i prototip bili jednaki.

U puno slučajeva nije potrebno razmatrati svaki pojedini aspekt strujanja, već samo najvažnija obilježja rubnih uvjeta. U praksi je npr. u većini slučajeva moguće strujanje unutar atmosferskog graničnog sloja promatrati kao stacionarno strujanje, pošto se makrometeorološke promjene unutar atmosfere odvijaju vrlo polako (red veličine nekoliko sati), tako da se utjecaj Strouhalove značajke može zanemariti. Sa zrakom kao fluidom je Prandtlova značajka na modelu i prototipu jednaka. Eckertova značajka nema dinamičkog značenja, tako da  $Ro$ ,  $Re$  i  $Gr$  značajke ostaju kao važni parametri. Rosbyeova značajka definira utjecaj Coriolisove sile i ne utječe na mjerne rezultate pri mjerenjima sile i tlaka, ali se pri proučavanju emisije štetnih plinova mora uzeti u razmatranje. Grashofova značajka se razmatra ukoliko je atmosferski granični sloj termički stratificiran, odnosno kada se javlja efekt uzgona. Pri modeliranju atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu se Grashofova značajka ne razmatra. Reynoldsova sličnost se ne može ostvariti, pošto su gustoća, brzina strujanja i kinematički viskozitet u modelu i prototipu istog reda veličine, pri čemu mjerilo varira između 1:50 i 1:5000. Međutim, atmosferski granični sloj je moguće dovoljno dobro modelirati u zračnom tunelu i kada sličnost Reynoldsove značajke nije ostvarena.

### 2.2.2. Sličnost strujanja

#### Profil brzine

Neutralno stratificirani atmosferski granični sloj je granični sloj konstantne debljine, unutar kojeg Coriolisova sila i gradijent tlaka određuju izgled profila brzine i Reynoldsovog tangencijalnog naprežanja. Ovi profili ostaju nepromijenjeni uzduž Zemljine površine. Donji dio atmosferskog graničnog sloja točno odgovara donjem dijelu u zračnom tunelu modeliranog graničnog sloja, prema [25]. Na osnovi obavljenih istraživanja moguće je stoga ustvrditi, da se atmosferski granični sloj može zadovoljavajuće modelirati u zračnom tunelu. Struktura graničnog sloja u blizini podloge ovisi isključivo o podnoj hrapavosti, odnosno o njenoj visini, gustoći raspodjele i obliku. Ukoliko je Reynoldsova značajka definirana korištenjem duljine hrapavosti  $z_0$ , tada je uvjet sličnosti strujanja kod modela i prototipa, prema [15]



$$\text{Re}_R = \frac{u_\tau \cdot z_0}{\nu} > 5, \quad (2.29)$$

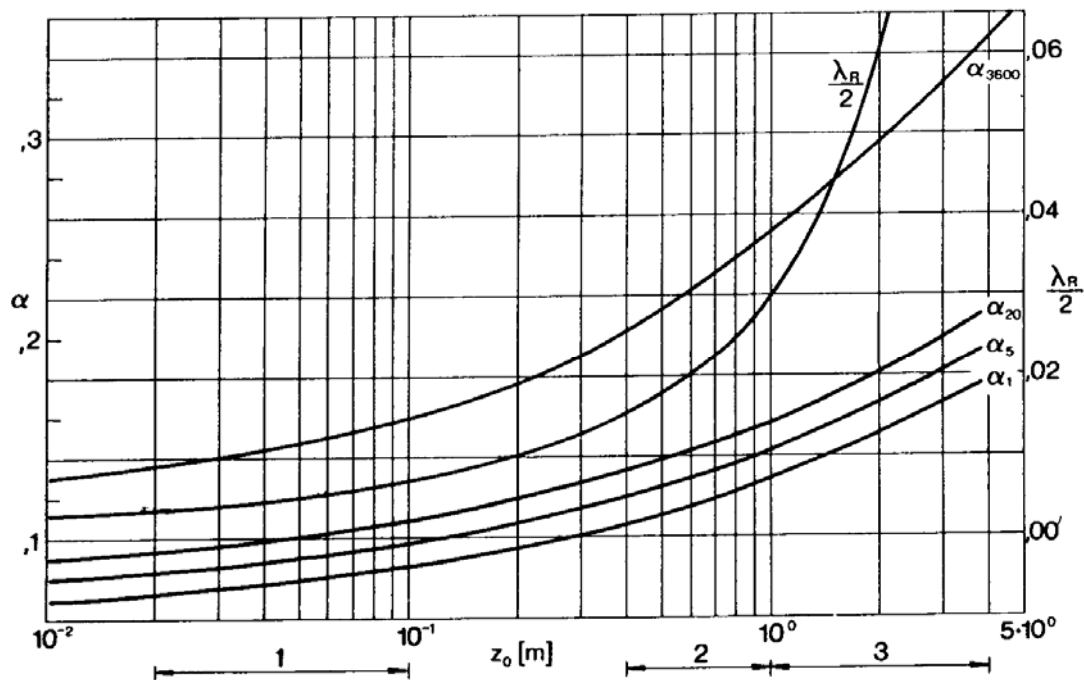
pri čemu je

$$\nu_{\text{zrak}} = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \text{ kod } 20^\circ\text{C i } 10^5 \text{ Pa.}$$

$u_\tau$  se može prema [13] pisati kao

$$u_\tau^2 = \lambda_R \frac{\bar{u}^2}{2}. \quad (2.30)$$

Brzina  $\bar{u}_{3600}$  (10) predstavlja osrednjenu vrijednost brzine kroz period od jednog sata na efektivnoj visini od 10 m. Vrijednosti  $\lambda_R/2$  dobivene eksperimentom, dane su ovisno o podnoj hrapavosti u dijagramu prikazanom na Sl. 2.10, prema [21] i [22].



Sl. 2.10: Srednja vrijednost eksponenta zakona potencije  $\alpha_{3600}$ , ekstremna vrijednost eksponenta zakona potencije  $\alpha_i$  i vrijednost koeficijenta trenja  $\lambda_R/2$  kao funkcije duljine hrapavosti  $z_0$

Drugi kriterij sličnosti je jednakost Jensenove značajke za model i prototip, prema [26],

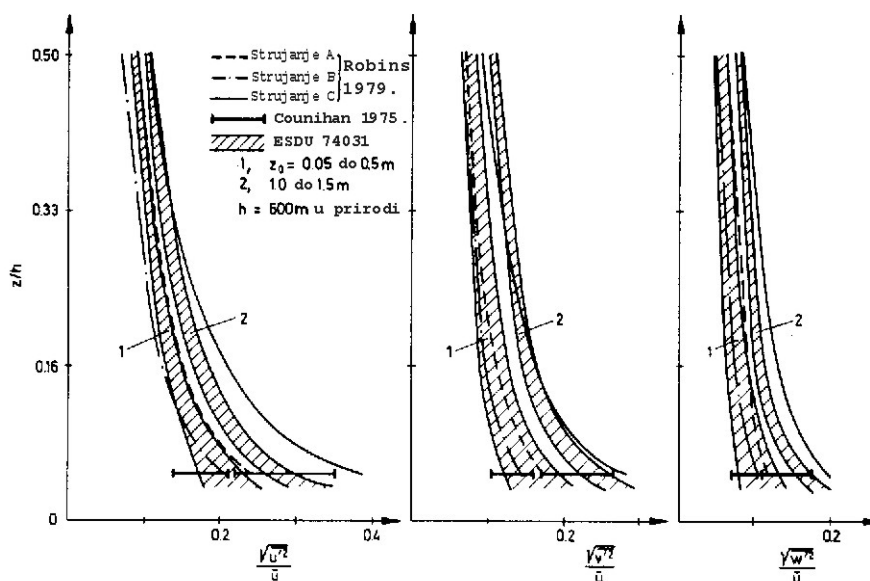
$$Je = \frac{Z_{0m}}{\delta_m} = \frac{Z_{0p}}{\delta_p} . \quad (2.31)$$

Treći kriterij sličnosti predstavlja jednakost eksponenta zakona potencije  $\alpha$  u prirodi i u zračnom tunelu, prema [15]

$$\alpha_m = \alpha_p . \quad (2.32)$$

### Intenzitet turbulencije

Dosadašnji rezultati modeliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu, prema [27], su pokazali da je moguće postići sličnost strukture turbulencije na modelu i prototipu. Također su dostupne i srednje vrijednosti parametara turbulencije unutar neutralno stratificiranog atmosferskog graničnog sloja, prema [20]. Usporedba rezultata mjerenja za potpuno razvijeni turbulentni granični sloj u zračnom tunelu, prema [28], i podataka dobivenih mjerenjima u prirodi je prikazana na Sl. 2.11, prema [3].



Sl. 2.11: Profil intenziteta turbulencije u aksijalnom smjeru: usporedba rezultata mjerenja u zračnom tunelu i prirodi, prema [3]

Preporučuje se da, kao pri modeliranju profila srednjih vrijednosti brzina, Jensenova značajka kod modela i prototipa ima istu vrijednost. Na taj se način turbulentna struktura iz prirode, prema [26], može dovoljno točno modelirati u zračnom tunelu.

### 2.2.3. Spektar kinetičke energije turbulencije

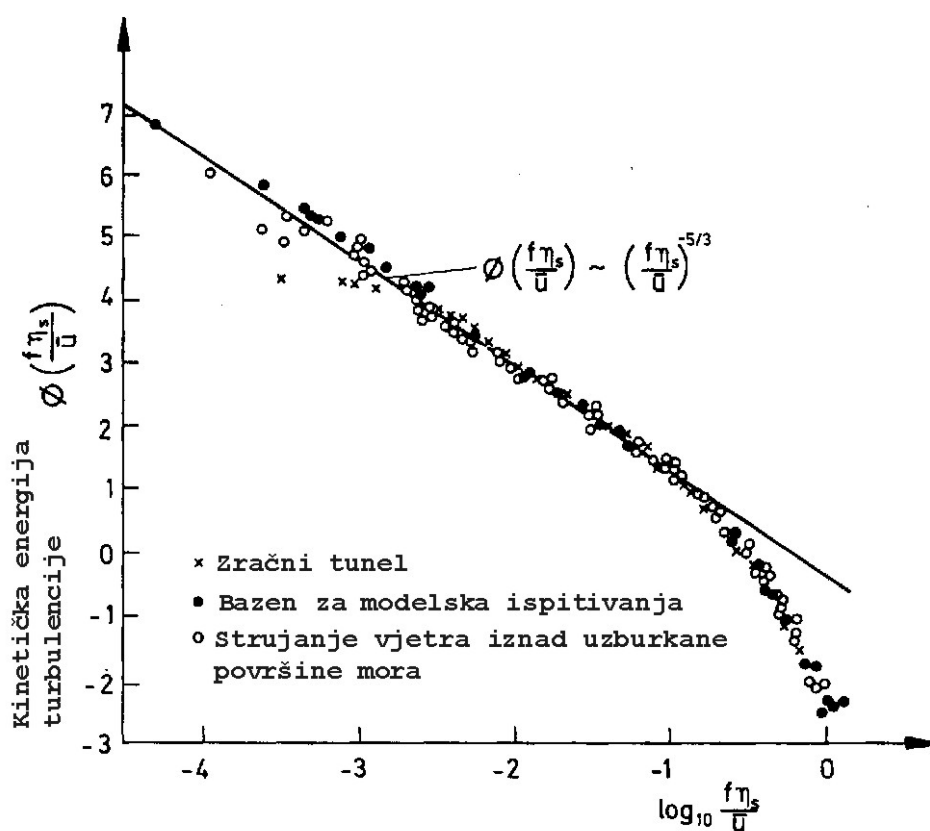
Nastajanje turbulencije u atmosferi je povezano s vrtlozima različitih veličina, što ima odlučujući utjecaj na oblik spektra kinetičke energije turbulencije. U zračnom tunelu nije moguće potpuno modeliranje spektra kinetičke energije turbulencije, pošto je

raspon frekvencija u prirodi vrlo velik (od nekoliko sekundi do više mjeseci). U aerodinamici zgrada proučavaju se isključivo spektri kinetičke energije turbulencije u aksijalnom smjeru vezani uz mikrometeorološke promjene.

Pri modeliranju spektra kinetičke energije turbulencije je cilj postizanje sličnosti strukture kod modela i prototipa. Ovaj uvjet ne može biti u potpunosti ispunjen, pošto postoje razlike u prirodi produkcije i disipacije energije. Disipacija energije se odvija u području najviših frekvencija i pod utjecajem viskoznosti određuje oblik spektra u ovom području. Na drugom kraju mikrometeorološkog područja, pri najnižim frekvencijama, se odvija produkcija energije. Između ova dva područja vrijedi zakon

Kolmogorova  $\Phi\left(\frac{f\eta_s}{\bar{u}}\right) \approx \left(\frac{f\eta_s}{\bar{u}}\right)^{-5/3}$ , Sl. 2.12, pri čemu je  $f$  frekvencija,  $\bar{u}$  osrednjena

vrijednost brzine u aksijalnom smjeru i  $\eta_s$  mjerilo duljine Kolmogorova.



Sl.2.12: Spektar kinetičke energije turbulencije, prema [29]

Potpuna sličnost je, prema [30], moguća samo onda kada su parametri u području disipacije i produkcije energije identični

$$\frac{f \cdot S(f)}{u_\tau} \approx \left(\frac{\kappa \cdot f \cdot z}{\bar{u}}\right)^{-\frac{2}{3}} = \left(\frac{\kappa^2 \cdot f \cdot z}{u_\tau \frac{\ln z}{z_0}}\right)^{-\frac{2}{3}} \quad (2.33)$$

Na Sl. 2.12 je prikazan spektar kinetičke energije turbulencije dobiven pri različitim eksperimentima u usporedbi s teoretskim zakonom Kolmogorova.

#### 2.2.4. Sličnost strujanja oko građevinskih objekata

##### Sličnost strujanja

Za postizanje geometrijski sličnog opstrujavanja modela u zračnom tunelu potrebno je da se inercijalne sile i sile trenja na modelu i prototipu nalaze u jednakom odnosu jedne prema drugima. Ovaj će zahtjev biti ispunjen ukoliko vrijedi

$$Re = \left( \frac{\bar{u} \cdot L}{\nu} \right)_{\text{model}} = \left( \frac{\bar{u} \cdot L}{\nu} \right)_{\text{prototip}}, \quad (2.34)$$

pri čemu je  $L$  = karakteristična dimenzija objekta za promatrani eksperiment.

Iz pretpostavke da je  $\nu_{\text{model}} = \nu_{\text{prototip}}$  proizlazi da je za ispunjenje navedenog uvjeta potrebno u zračnom tunelu postići brzine strujanja, koje u pravilu u zračnim tunelima za simulaciju atmosferskog graničnog sloja nisu ostvarive. Sličnost opstrujavanja objekta na modelu i prototipu se, međutim može ovisno o obliku objekta postići i kada je  $Re_{\text{model}} < Re_{\text{prototip}}$ . Kod aerodinamički obliha tijela dostatno je povećanje hrapavosti površine modela korištenjem u najvećem broju slučajeva rebrastih hrapavosti ili nanošenjem na površinu hrapavosti u obliku zrnaca pijeska. Kod objekata s oštrim rubovima su nasuprot aerodinamički obliha tijelima, točke odvajanja struje zraka od objekta unaprijed točno određene. Pritom treba, prema [31], biti ispunjen slijedeći uvjet

$$Re_{\text{model}} = \frac{\bar{u}_\delta \cdot L}{\nu} > 5 \cdot 10^4, \quad (2.35)$$

pri čemu je

- $\bar{u}_\delta$  - osrednjena vrijednost brzine struje zraka u aksijalnom smjeru na visini  $z = H_\delta$ ,
- $L$  - karakteristična dimenzija modela,
- $\nu$  - koeficijent kinematičkog viskoziteta zraka.

##### Stupanj začepjenosti ("blockage") mjerne sekcije zračnog tunela

Pri ispitivanjima u zračnom tunelu mora se izbjeći utjecaj stijenki mjerne sekcije zračnog tunela na strukturu modeliranog graničnog sloja. Pri opisu tog utjecaja se koristi tzv. stupanj začepjenosti mjerne sekcije, koji se definira kao omjer projekcije nastrujavane površine modela i poprečnog presjeka mjerne sekcije zračnog tunela. Ukoliko je navedeni omjer veći od 5% dolazi do deformiranja strukture modeliranog graničnog sloja, tako da se, prema [15], preporučuje

$$\frac{A_M}{A_K} \leq 5\%. \quad (2.36)$$

Do deformacije strukture modeliranog graničnog sloja dolazi i u slučaju kada je model smješten na nedovoljnoj udaljenosti u odnosu na jednu od stijenki mjerne

sekcije zračnog tunela. Pri izbjegavanju sličnih problema mogu se također koristiti razne dodatne opcije koje predstavljaju dodatnu opremu jednog zračnog tunela, kao što su npr. pomične stijenke mjerne sekcije zračnog tunela, prema [32]. Razmatranje efekta začepljenosti mjerne sekcije zračnog tunela može se vršiti i računskim putem. Ovisno o predmetu istraživanja mogu se izmjerene veličine poboljšati uvođenjem prirasta brzine, prema [33], ili razmatranjem promjene statičkog tlaka u neposrednoj blizini modela, prema [34].

### **2.3. Simuliranje atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu**

Atmosferski granični sloj se kod zračnih tunela s dovoljno dugom mjernom sekcijom modelira korištenjem hrapavosti, koja se nanosi na pod mjerne sekcije. Kod zračnih tunela s kraćom mjernom sekcijom se pri modeliranju atmosferskog graničnog sloja koristi kombinacija podne hrapavosti i generatora vrtloga.

#### **2.3.1. Zračni tuneli s dugom mjernom sekcijom**

Strujanje vjetra iz prirode u mjernoj sekciji zračnog tunela s dugom mjernom sekcijom se razvija uz pomoć podne hrapavosti. Nastaje turbulentni granični sloj koji odgovara atmosferskom graničnom sloju s obzirom na profil osrednjenih brzina u aksijalnom smjeru i profil intenziteta turbulencije. Mjerilo u kojem se atmosferski granični sloj modelira u zračnom tunelu može se dobiti usporedbom duljine hrapavosti  $z_0$  i integralne duljinske mjere turbulencije atmosferskog graničnog sloja i modeliranog graničnog sloja u zračnom tunelu. Kod zračnih tunela s dugom mjernom sekcijom se modeliranje u najvećem broju slučajeva vrši u mjerilima 1:500 – 1:1000. Pri modeliranju atmosferskog graničnog sloja koji se npr. razvija iznad livade s rijetkim stablima, i uz duljinu mjerne sekcije od 20 m, debljina modeliranog graničnog sloja iznosi 400 mm.

#### **2.3.2. Zračni tuneli s kratkom mjernom sekcijom**

U velikoj se većini slučajeva zračni tuneli za modeliranje atmosferskog graničnog sloja izvode s kratkom mjernom sekcijom. Da bi bilo moguće modeliranje graničnog sloja odgovarajuće debljine, koriste se uz podnu hrapavost i odgovarajući objekti koji pridonose bržem rastu debljine graničnog sloja. Sl. 2.13, prema [24], prikazuje najčešće metode modeliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu. Counihanovi generatori turbulencije [2] i raspored s mrežom i barijerom prema Cooku [26] su najčešće korištene metode. Sve metode modeliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnim tunelima s kratkom mjernom sekcijom sadrže tri osnovne komponente: podnu hrapavost, barijeru i objekte za generiranje strukture turbulencije graničnog sloja.

Vrsta podne hrapavosti (visina i gustoća raspodjele) određuje u najvećoj mjeri strukturu profila osrednjenih brzina u aksijalnom smjeru i profila intenziteta turbulencije. Barijera i objekti za generiranje strukture turbulencije graničnog sloja skraćuju duljinu mjerne sekcije potrebnu za zadovoljavajuće modeliranje atmosferskog graničnog sloja. Barijera doprinosi naglom gubitku iznosa količine gibanja u donjem dijelu graničnog sloja. Ona je u velikom broju slučajeva propusna ili je gornji brid izveden “nazubljeno”, da bi se skratilo područje neizobraženog strujanja

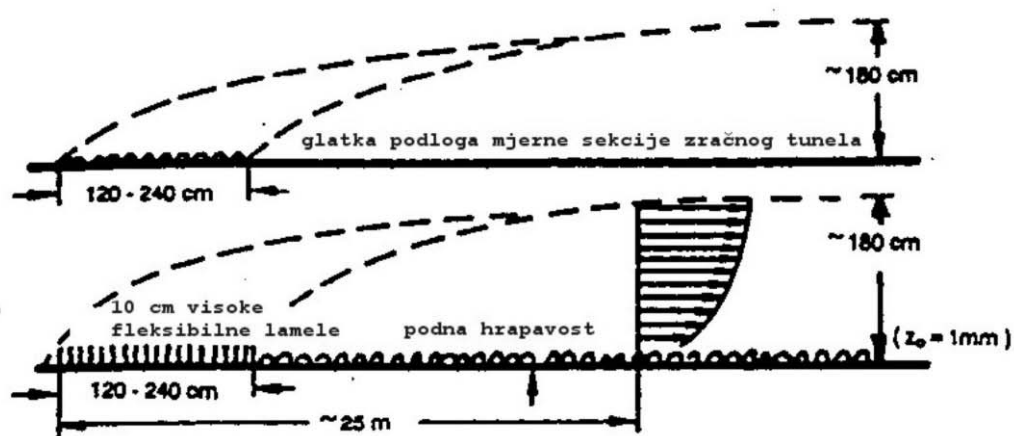
iza barijere. Visina i oblik barijere određuju iznos gubitka količine gibanja u donjem dijelu graničnog sloja. Povišenjem barijere uz jednaki raspored podne hrapavosti i objekata koji pridonose bržem rastu debljine graničnog sloja postaju debljina graničnog sloja i integralna duljinska mjera turbulencije veći. Pri većim mjerilima modeliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu nije moguće modelirati kompletan granični sloj, već samo njegov donji dio, što je u velikoj većini slučajeva dostatno. Uobičajena mjerila su 1:100 do 1:1000.

### 2.3.3. Ujednačenost strujnog polja u mjernoj sekciji zračnog tunela

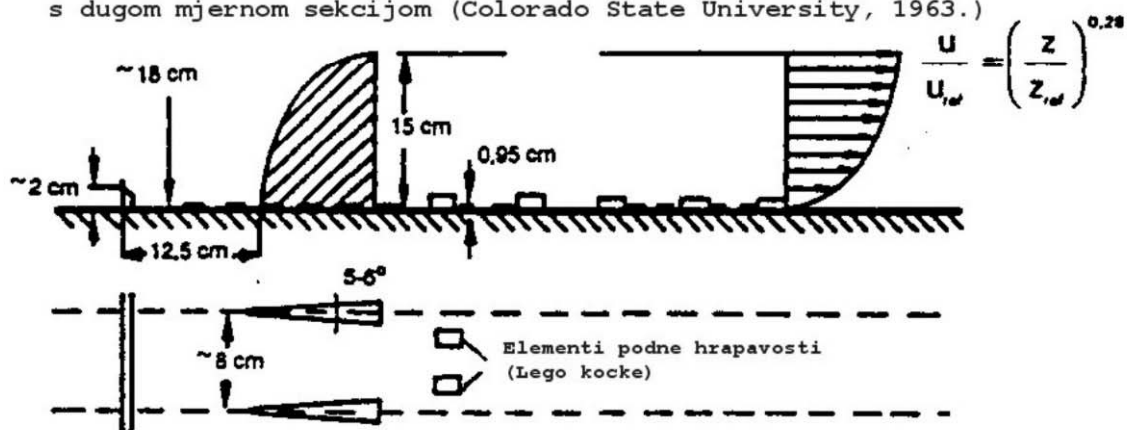
U praznoj mjernoj sekciji zračnog tunela bi odstupanja osrednjene vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru u horizontalnim ravninama izvan graničnih slojeva koji se formiraju na bočnim stijenama mjerne sekcije zračnog tunela trebala biti vrlo mala. Dopušteno odstupanje iznosi  $\pm 10\%$ , prema [15].

Odstupanje statičkog tlaka u praznoj mjernoj sekciji zračnog tunela je, prema [15], definirano izrazom

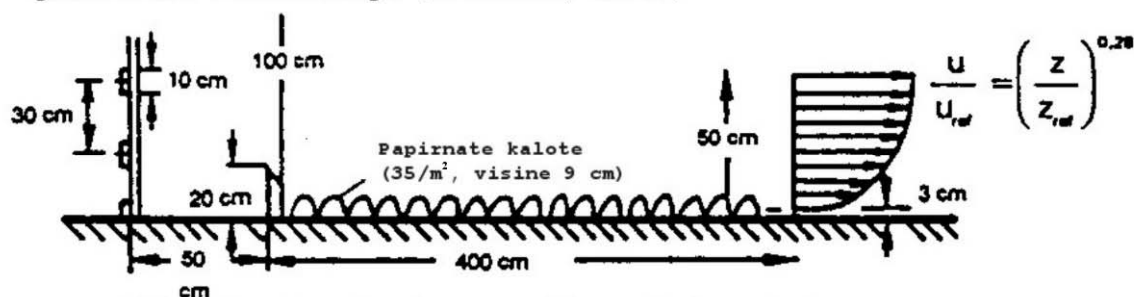
$$\frac{\frac{\partial p}{\partial x} \cdot \delta}{\frac{1}{2} \rho \cdot \bar{u}_\delta^2} \leq 0.05. \quad (2.37)$$



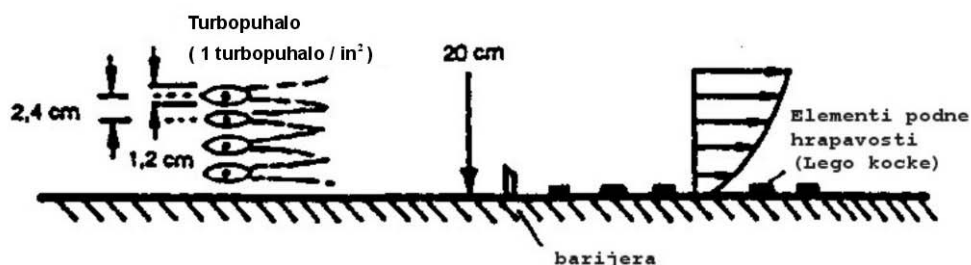
a. Modeliranje atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu s dugom mjernom sekcijom (Colorado State University, 1963.)



b. Modeliranje atmosferskog graničnog sloja primjenom generatora turbulencije (Counihan, 1971.)



c. Modeliranje atmosferskog graničnog sloja primjenom barijere (Cook, 1973.)



d. Modeliranje atmosferskog graničnog sloja primjenom turbopuhala (Teunissen, 1974.)

Sl 2.13: Metode modeliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu, prema

### 3. Zračni tunel i modeliranje atmosferskog graničnog sloja

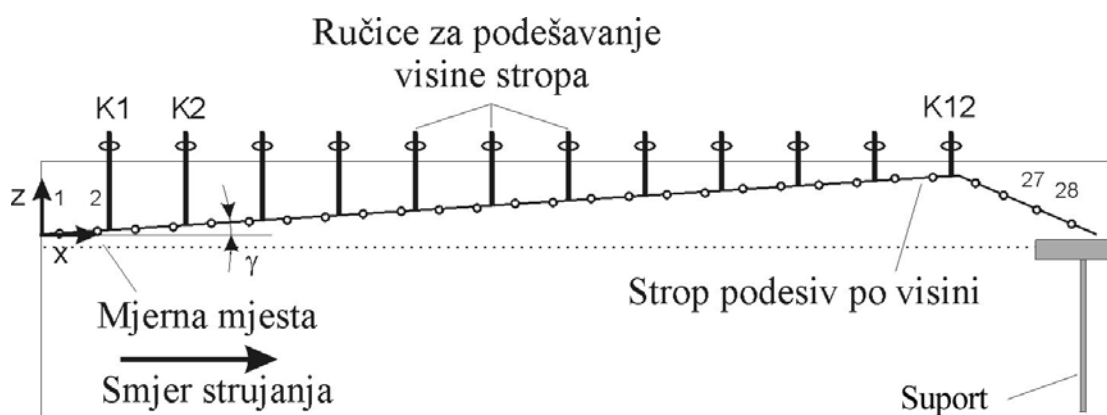
#### 3.1. Zračni tunel

Ispitivanja su izvršena u zračnom tunelu C za modeliranje atmosferskog graničnog sloja Katedre za Mehaniku fluida Tehničkog Sveučilišta u Münchenu, prikazanog na Sl. 3.2, koji je namijenjen isključivo za provođenje ispitivanja u području aerodinamike zgrada.

Eksperimentiranje je moguće uz zatvoreni i otvoreni sustav rada zračnog tunela. Mjerenja brzine, tlaka i sile se vrše pri zatvorenoj, a mjerenja koncentracije pri otvorenoj mjernoj sekciji zračnog tunela. Promjena iz zatvorenog u otvoreni sustav se vrši uz pomoć pokretnih ploča. Ulazni i izlazni otvor zračnog tunela prema atmosferi se nalaze udaljeni jedan od drugoga, te se nagib njihovih poklopaca također može regulirati, što omogućava provođenje ispitivanja i pri nepovoljnim vremenskim uvjetima. Ispod otvora je ugrađen prigušivač zvuka, koji buku tijekom izvođenja eksperimenta prigušuje na 60 dB na izlaznom, odnosno ulaznom presjeku zračnog tunela. Protuprašni filter u ulaznom presjeku svodi količinu onečišćenja mjerne sekcije zračnog tunela na najmanju moguću mjeru.

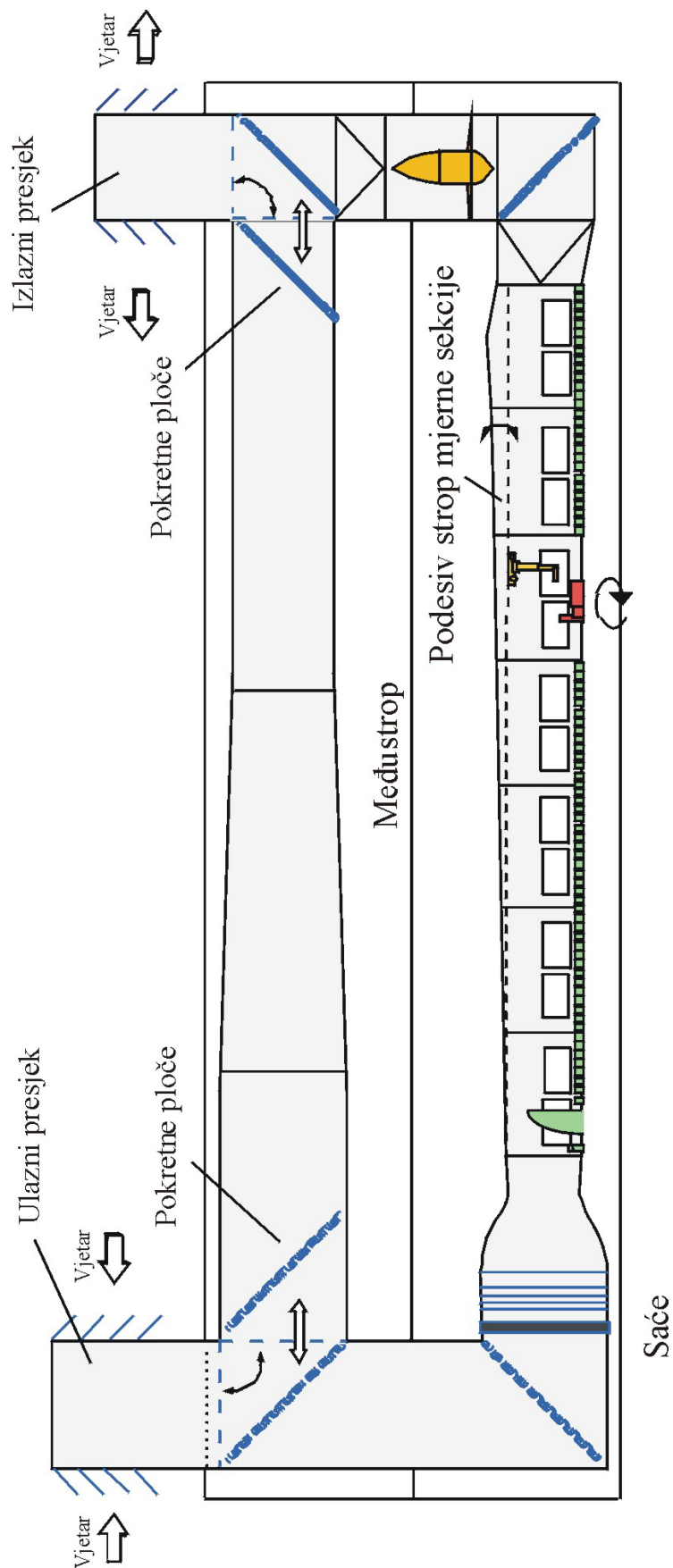
Ispitivanja opisana u ovom radu su izvršena pri zatvorenom sustavu rada zračnog tunela. Zrak struji kroz ulazni poprečni presjek zračnog tunela, kutni element, te nakon prostrujavanja kroz saće i četiri sita nailazi na mjernu sekciju zračnog tunela, nakon koje nailazi na kutni element i biva ponovo usmjeren prema ulaznom poprečnom presjeku zračnog tunela. Saće i sita omogućavaju ravnomjeran profil osrednjenih brzina i intenziteta turbulencije u aksijalnom smjeru. Sapnica tipa Börger stupnja kontrakcije 2.12 : 1 pridonosi također poboljšanju stabilnosti strujanja, tako da intenzitet turbulencije u aksijalnom smjeru na početku mjerne sekcije zračnog tunela iznosi manje od 1%.

Mjerna sekcija zračnog tunela duljine 19.4 m je zatvorenog tipa. Poprečni presjek predstavlja četverokut visine 1.8 m i širine 2.7 m, što omogućava simuliranje graničnih slojeva do 1.8 m debljine. Tijekom izvođenja eksperimenata se procesi u mjernoj sekciji zračnog tunela mogu promatrati kroz velike prozore od pleksiglasa, koji se nalaze na prednjoj strani zračnog tunela i omogućavaju laki pristup izvana do svakog pojedinog dijela mjerne sekcije.



Sl. 3.1: Po visini podesiv strop mjerne sekcije zračnog tunela





Sl. 3.2: Zračni tunel C za modeliranje atmosferskog graničnog sloja Katedre za Mehaniku fluida Tehničkog Sveučilišta u Münchenu

Strop mjerne sekcije zračnog tunela je podesiv po visini (60 cm visine na 2.4 m duljine), što omogućava smanjenje pada tlaka koji nastaje duž mjerne sekcije uslijed trenja. Visina se podešava uz pomoć 12 ručica koje se nalaze u razmacima od 1.4 m, Sl. 3.1. Na ručicama se nalaze brojila. Jedan okretaj ručice odgovara promjeni visine stropa mjerne sekcije zračnog tunela od 1 mm. Visine stropa mjerne sekcije zračnog tunela kod pojedinih ručica su prikazane Tablicom 3.1, uz konstantni kut nagiba stropa  $\gamma$ .

	Kut nagiba $\gamma$	0.0°	0.4°	0.5°	0.6°	1.0°	1.5°	2.0°	2.3°
Ručica br.	x-koordinata (mm)	z (mm)	z (mm)	z (mm)	z (mm)	z (mm)	z (mm)	z (mm)	z (mm)
1	1400	0	10	12	15	24	37	49	56
2	2800	0	20	24	29	49	73	98	112
3	4200	0	29	37	44	73	110	147	169
4	5600	0	39	49	59	98	147	196	225
5	7000	0	49	61	73	122	183	244	281
6	8400	0	59	73	88	147	220	293	337
7	9800	0	68	86	103	171	257	342	394
8	11200	0	78	98	117	195	293	391	450
9	12600	0	88	110	132	220	330	440	506
10	14000	0	98	122	147	244	367	489	562
11	15400	0	108	134	161	269	403	538	619
12	16800	0	117	147	176	293	440	587	675

Tablica 3.1: Visina stropa mjerne sekcije zračnog tunela kod pojedinih ručica uz konstantni kut nagiba stropa mjerne sekcije zračnog tunela  $\gamma$

Vrijednosti iz Tablice 3.1 se izračunavaju prema sljedećem izrazu

$$z = x \cdot \operatorname{tg}(\gamma). \quad (4.1)$$

Pri podešavanju visine stropa mjerne sekcije zračnog tunela razlika visine stropa kod dvaju susjednih ručica ne smije iznositi više od 50 mm, da ne bi došlo do oštećenja segmentiranih ploča od kojih je strop sastavljen i elastičnih fuga koje se nalaze na mjestima dodira dvaju susjednih ploča.

U podu mjerne sekcije, ca. 11.3 m iza sapnice, se nalazi središte rotirajuće kružne ploče. Rotirajuća kružna ploča služi kao nosač modela i omogućava simulaciju nastrojavanja modela iz različitih smjerova.

Na kraju mjerne sekcije zračnog tunela se nalazi gusta metalna mreža, koja onemogućava da pojedini eventualno otkinuti dijelovi modela oštete propeler ventilatora. Ona također služi i za smirivanje struje zraka, koja je na kraju mjerne sekcije vrlo turbulentna.

Poseban element omogućava prijelaz s četvrtanog na kružni profil u kojem se nalazi aksijalni ventilator instalirane snage 180 kW, što omogućava brzine strujanja zraka u zračnom tunelu do 30 m/s. Brzinu strujanja zraka u mjernoj sekciji zračnog tunela moguće je regulirati, pri čemu je moguća regulacija broja okretaja ventilatora i regulacija nagiba zakretnih lopatica u kutnom elementu. Regulacija brzine strujanja vrši se na taj način da se mjeri brzina struje zraka na ulazu u mjernu sekciju i uz

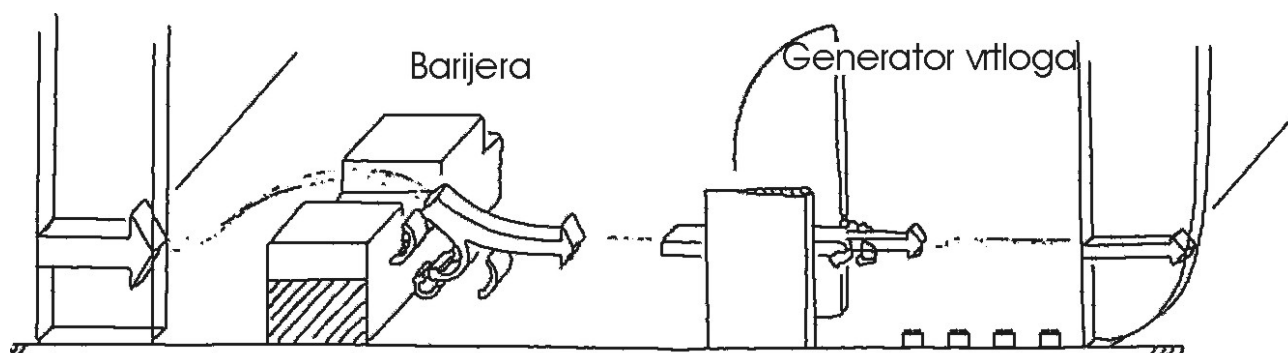
pomoć dobivenih rezultata se regulira broj okretaja ventilatora. Promjenom nagiba zakretnih lopatica, koje se nalaze u kutnom elementu, mijenja se odnos broja okretaja ventilatora i brzine struje zraka na ulazu u mjernu sekciju zračnog tunela.

Brzina struje zraka se može kontinuirano regulirati od minimalne (1 m/s) do maksimalne vrijednosti (30 m/s). Fiksne lopatice koje su smještene prije i poslije ventilatora smanjuju nivo intenziteta turbulencije i time gubitke u nadolazećem kutnom elementu. Kratki difuzor čini prijelaz na kvadratni poprečni presjek izlaza zračnog tunela.

Poseban suport omogućava mjerenje raznim mjernim uređajima na svakoj pojedinoj poziciji mjerne sekcije, pri čemu ne dolazi do deformacije strukture modeliranog graničnog sloja.

### 3.2. Metoda modeliranja atmosferskog graničnog sloja

Za modeliranje atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu je korištena metoda po Counihanu, prema [2], [35], [36]. Pritom su korišteni barijera, generatori vrtloga i podna hrapavost, koji su projektirani u skladu s Counihanovim relacijama, prema [2], [35], [36]. Na Sl. 3.3 je prikazan princip generiranja graničnog sloja u mjernoj sekciji zračnog tunela po Counihanovoj metodi.

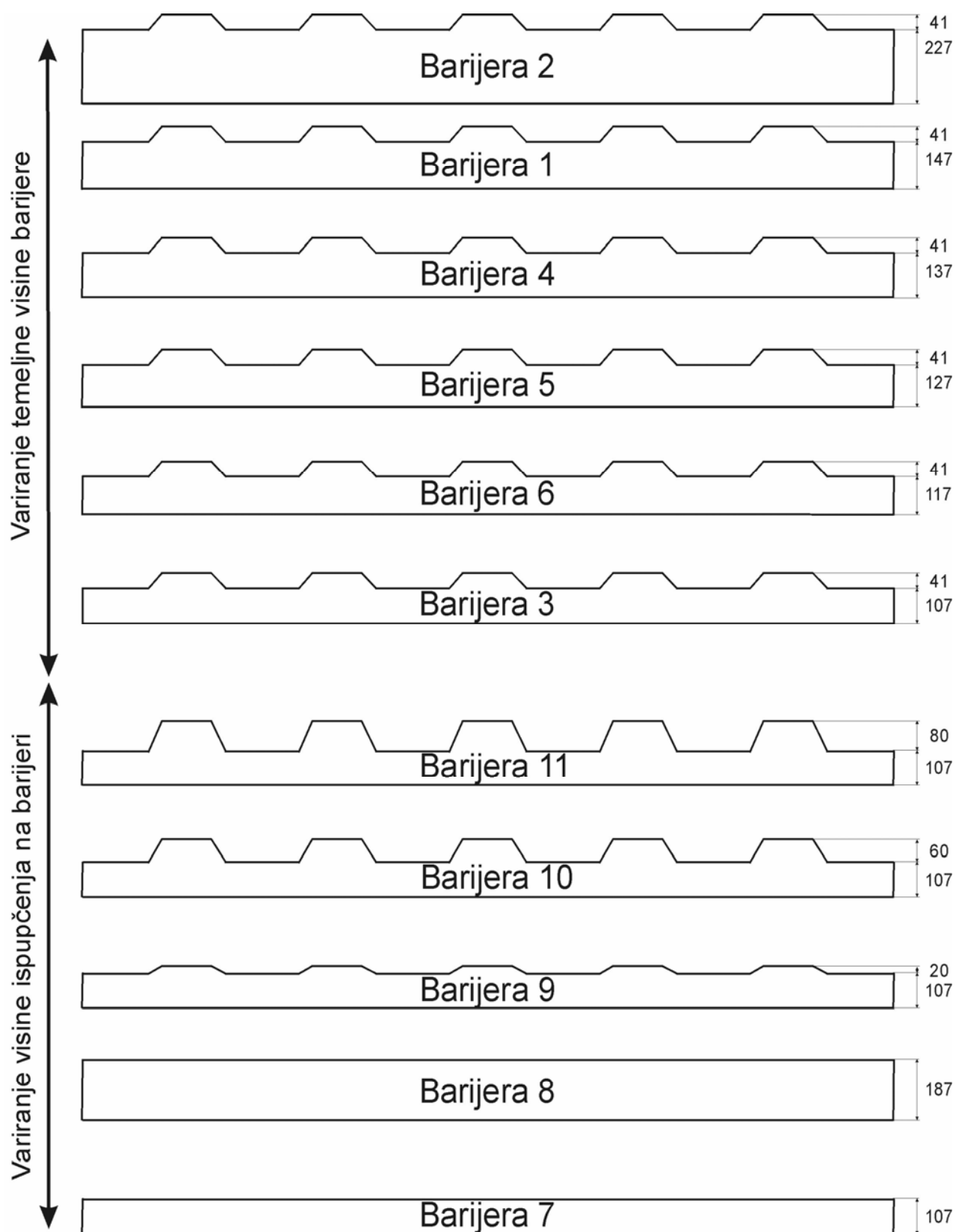


Sl. 3.3: Princip generiranja graničnog sloja po Counihanovoj metodi, prema [37]

Barijera služi za generiranje vrtloga s horizontalnom osi vrtnje, a generatori vrtloga za generiranje vrtloga s vertikalnom osi vrtnje. Podna hrapavost modelira strukturu donjeg dijela graničnog sloja, a na određenoj poziciji iza generatora vrtloga se modelirani granični sloj nalazi u stanju ravnoteže.

#### 3.2.1. Barijera

Barijera se koristi za generiranje vrtloga s horizontalnom osi vrtnje i redukciju osrednjenih vrijednosti brzine u donjem dijelu modeliranog graničnog sloja. Visina barijere može se mijenjati u koracima od 5 mm, kao i ispupčenja koja su pričvršćena na gornju ravnu površinu barijere. Tijekom izvođenja eksperimenata korišteno je 11 različitih barijera, prikazanih na Sl. 3.4. Numeriranje barijera odgovara vremenskom slijedu izvođenja eksperimenata. Barijera označena brojem 1 je izrađena skaliranjem barijere koju je Counihan koristio u svojim eksperimentima. Ostale barijere predstavljaju različite varijacije Counihanove barijere u cilju modeliranja graničnog sloja što sličnijeg atmosferskom.

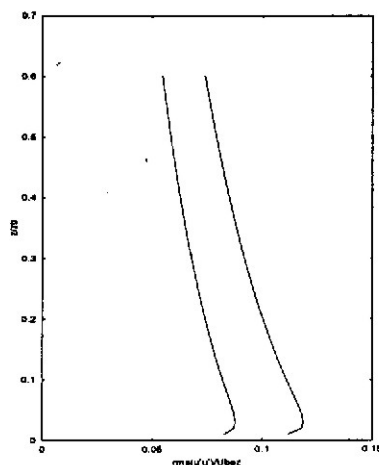


Sl. 3.4: Barijere

### 3.2.2. Generatori vrtloga

Donji dio modeliranog atmosferskog graničnog sloja je vrlo važan za praktične primjene. Generiranju turbulentne strukture donjeg dijela atmosferskog graničnog sloja znatno pridonose generatori vrtloga. Održanju turbulentne strukture na određenom nivou i generiranju uravnoteženog graničnog sloja doprinosi u znatnoj mjeri podna hrapavost.

Iza generatora vrtloga, nizvodno, formira se granični sloj čija debljina odgovara visini generatora vrtloga. Na Sl. 3.5 je prikazan profil intenziteta turbulencije



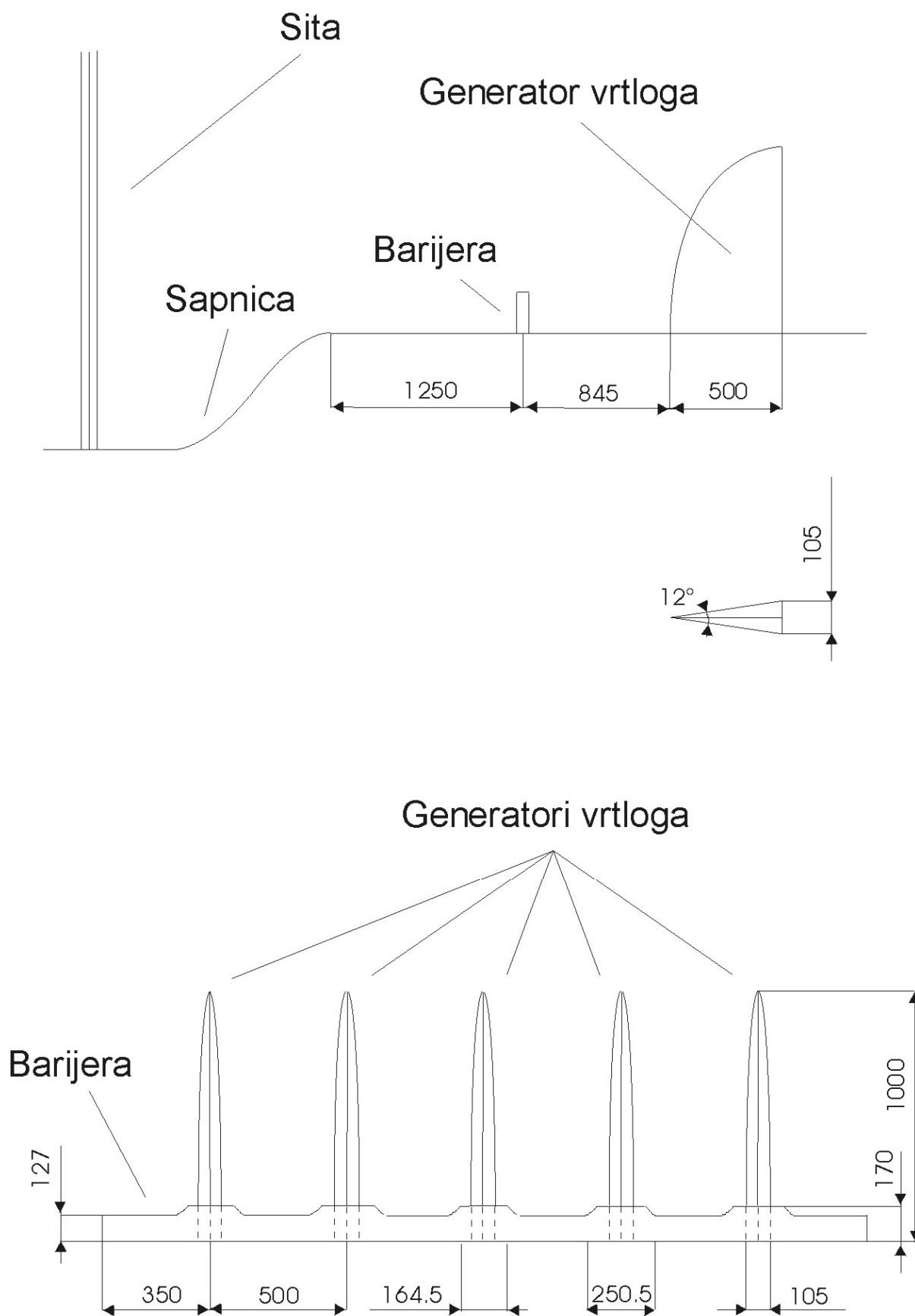
Sl. 3.5: Profil intenziteta turbulencije nizvodno od generatora vrtloga, prema [20] i [38]

nizvodno iza generatora vrtloga. Intenzitet turbulencije je konstantan do 15% debljine graničnog sloja i opada s daljnjim povećanjem visine. Counihanovi eksperimenti s trokutastim generatorima vrtloga, prema [35], su pokazali tendenciju k velikom gubitku iznosa količine gibanja u donjem dijelu i nedovoljnom gubitku iznosa količine gibanja u gornjem dijelu graničnog sloja. Primjenom eliptičnih generatora vrtloga turbulentna struktura graničnog sloja postaje slična strukturi u atmosferi. Stoga su pri vlastitim eksperimentima korišteni eliptični generatori vrtloga.

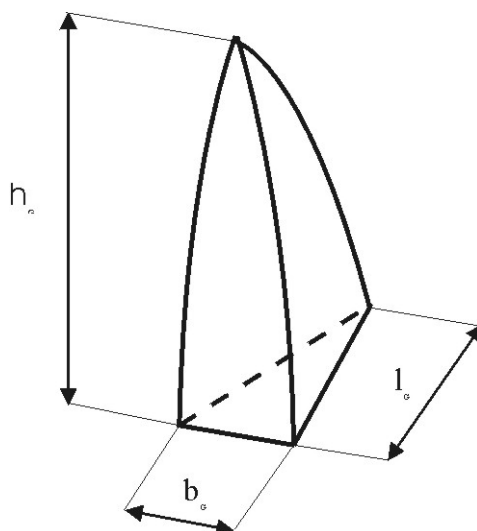
Bokocrt generatora vrtloga predstavlja četvrtina površine elipse, čija je velika poluos dvaput veća od male poluosi. Vršni kut u horizontalnim presjecima ostaje konstantan neovisno o promjeni visine. Vrh generatora vrtloga je usmjeren u smjeru suprotnom od struje zraka. Bočne plohe su simetrične u odnosu na struju zraka, pa su stoga karakteristike strujanja na objema stranama identične.

Vršni bi kut prema prijedlogu Counihana [35] trebao iznositi  $5^\circ \div 6^\circ$ . Pri vlastitim ispitivanjima su korišteni generatori vrtloga s vršnim kutem  $6^\circ$ , koji je konstantan po cijeloj visini generatora vrtloga. Polazna pretpostavka ovih ispitivanja je da je debljina graničnog sloja u atmosferi 500 m, na temelju čega su projektirani generatori vrtloga (visina generatora vrtloga 1 m, duljina 0.5 m), prikazano na Sl. 3.7 i Tablici 3.2.

Pri vlastitim istraživanjima je korišteno pet generatora vrtloga međusobno razmaknutih za 0.5δ (0.5 m), pošto se u [2] i [35] pokazalo, da se struktura graničnog sloja najuspješnije modelira kada je razmak među generatorima  $0.5 \div 0.6\delta$ . Raspored objekata u mjernoj sekciji zračnog tunela je prikazan na Sl. 3.6.



Sl. 3.6: Raspored objekata u mjernoj sekciji zračnog tunela



Sl. 3.7: Generator vrtloga

Mjerilo	$b_G$ (mm)	$h_G$ (mm)	$l_G$ (mm)
1:500	105	1000	500

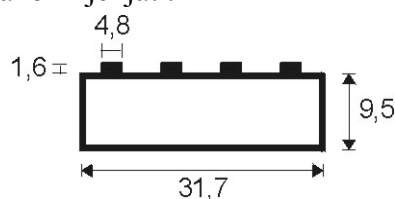
Tablica 3.2: Dimenzije generatora vrtloga

Razmak između barijere i prednje (vršne) strane generatora vrtloga iznosi pri Counihanovim eksperimentima  $\frac{5}{6}\delta$  (ca. 83% debljine graničnog sloja), prema [2], [35], [36], a pri vlastitim istraživanjima je taj razmak iznosio 0.845 m.

### 3.2.3. Podna hrapavost

Podna hrapavost služi za generiranje odgovarajuće strukture turbulencije u donjem dijelu modeliranog graničnog sloja. Pod mjerne sekcije, nizvodno u odnosu na generatore vrtloga, treba prema [35] biti obložen podnom hrapavosti u minimalnoj duljini  $3 \div 4\delta$  iza stražnje plohe generatora vrtloga da bi modelirani granični sloj postigao stanje ravnoteže.

Pod mjerne sekcije zračnog tunela je oblijepljen LEGO pločama dimenzija 380 x 380 mm, na koje su pričvršćene LEGO kocke, čije su dimenzije prikazane na Sl. 3.8. Na svakoj ploči je pravilno raspodijeljeno 2304 malenih ispupčenja (48 x 48 čvorova). Gustoća raspodjele LEGO kocaka u odnosu na ukupnu površinu poda mjerne sekcije, te njihova visina mogu se lako mijenjati.

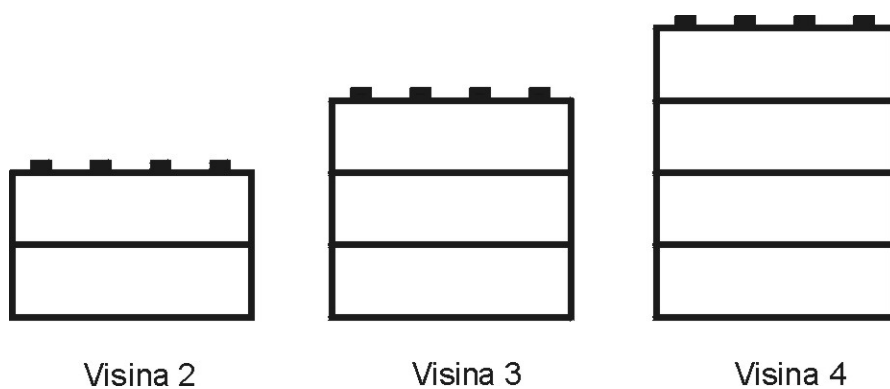


Sl. 3.8: Dimenzije LEGO kocke

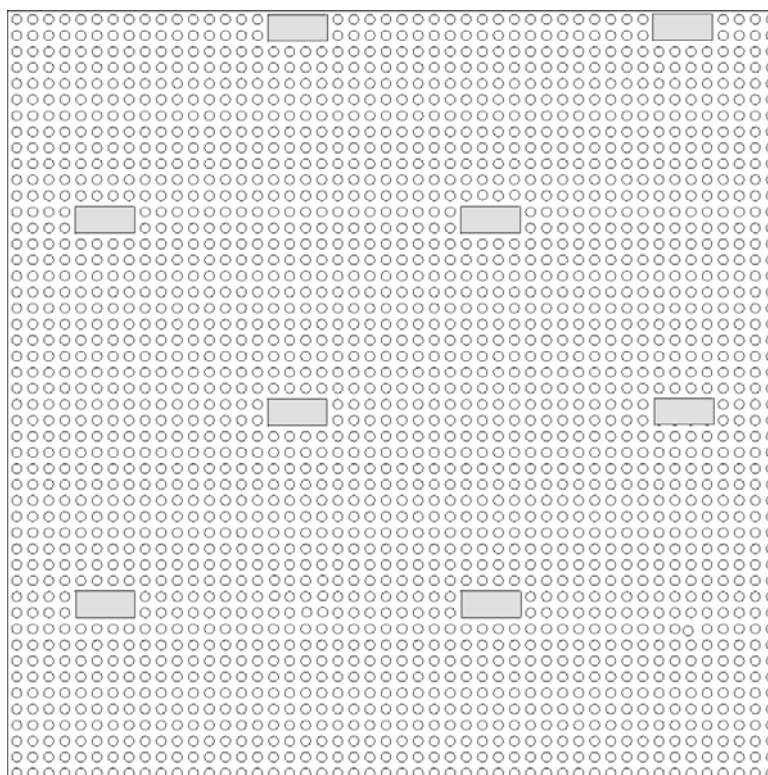
Različiti tipovi podne hrapavosti R1 ... R4, izvedeni su variranjem gustoće obloženosti poda mjerne sekcije LEGO kockama i visine LEGO kocaka, Tablica 3.3.

	Raspored 1 (Gustoća podne hrapavosti 2,78%)	Raspored 2 (Gustoća podne hrapavosti 1,39%)
Visina 2	-	R4
Visina 3	R1	R2
Visina 4	-	R3

Tablica 3.3: Podne hrapavosti

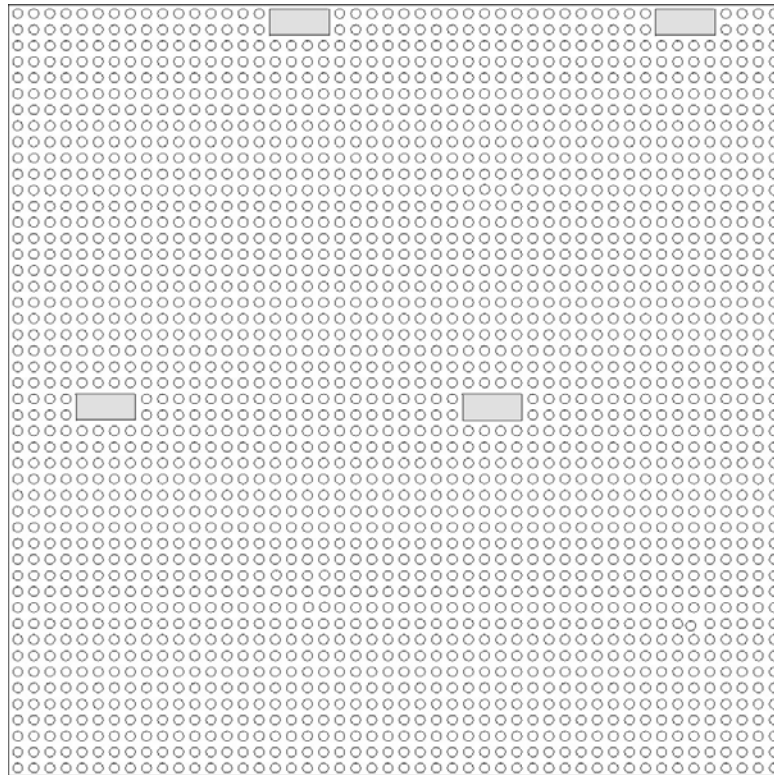


Sl. 3.9: Visina elemenata hrapavosti

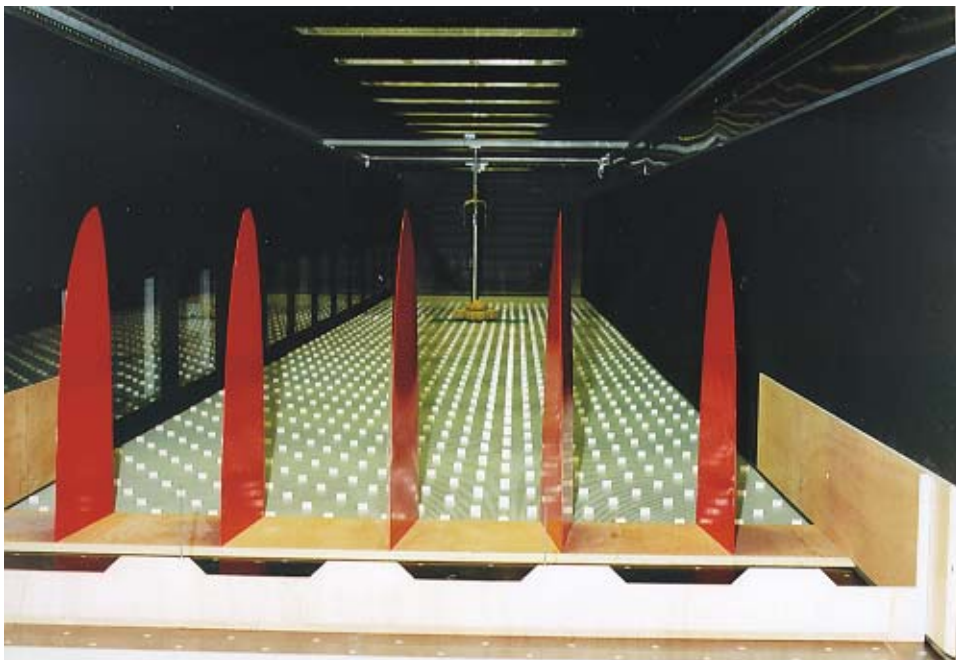


Sl. 3.10: Gustoća podne hrapavosti 1 (2.78%)





Sl. 3.11: Gustoća podne hrapavosti 2 (1.39%)



Sl. 3.12: Pogled na mjernu sekciju

Na Sl. 3.9 su prikazane visine pojedinih elemenata hrapavosti, a na Sl. 3.10 i 3.11 različiti rasporedi elemenata hrapavosti na podlozi, koji su korišteni pri eksperimentima. Zbog relativno male gustoće obloženosti poda mjernu sekciju LEGO kockama odabrao sam pri obradi podataka visinu ispupčenja na LEGO pločama (2 mm) kao debljinu istisnuća  $d$ , pošto je gibanje držača sonde ograničeno, te nije

moguće mjeriti brzinu na visinama manjim od 50 mm (mjereno od površine LEGO ploče).

Na Sl. 3.12 je prikazan pogled na mjernu sekciju zračnog tunela s objektima za generiranje graničnog sloja.

## 4. Rezultati mjerenja i diskusija

### 4.1. Opis mjerne opreme i procesa mjerenja

#### 4.1.1. Mjerenje tlaka

U po visini podesivom stropu je u uzdužnom smjeru, u razmacima od 0.7 m, smješteno 28 mjernih mjesta, koji su povezani s mjernim uređajem za mjerenje vrijednosti statičkog tlaka. Numeracija počinje s brojem 1 na početku mjerne sekcije, a završava s brojem 28 na kraju mjerne sekcije. Mjerno mjesto 18, koje se nalazi u sredini mjerne sekcije, predstavlja referentno mjerno mjesto, s čijim se rezultatima uspoređuju rezultati mjerenja u preostalim mjernim mjestima. Tlak se mjeri s osjetnikom tlaka tipa "LPX 5480", čije je mjerno područje 100 Pa. Izmjerena odstupanja iznose maksimalno  $\pm 5$  Pa. Mjerenja su izvršena pri konstantnom broju okretaja aksijalnog ventilatora (800 1/min) korištenjem PC programa DIADEM. Frekvencija uzorkovanja je iznosila 100 Hz, a vrijeme uzorkovanja je 10 s.

#### 4.1.2. Mjerenje brzine

Mjerenja su vršena trostrukom užarenom žicom "Dantec P55" priključenom na anemometar "AALAB AN 1003". Izlazne vrijednosti anemometra su tri različita napona, koji se uz pomoć usporedbe i interpolacije s rezultatima kalibriranja pretvaraju u mjerne rezultate. Mjerenja su izvršena pri frekvenciji uzorkovanja 10 kHz uz vrijeme uzorkovanja 150 s i "low-pass" filter 620 Hz. Pri mjerenjima je korištena kartica Data Translation, tip DT 2821-F. Uz frekvenciju uzorkovanja 10 kHz se analogni rezultat mjerenja brzine vrlo dobro može predložiti diskretnim vrijednostima. Odabirom vremena uzorkovanja 150 s se izbjegava utjecaj niskofrekventnih oscilacija vrijednosti brzine na iznos osrednjene vrijednosti brzine.

Prvo je mjerenje izvršeno korištenjem uskog stativa, pošto je uočeno da u zračni tunel ugrađeni suport (pokretni mehanizam koji služi kao nosač držala sonde) vođen CNC programom uzrokuje deformacije profila osrednjenih brzina u aksijalnom smjeru. Pri korištenju stativa je prije mjerenja u svakom pojedinom mjernom mjestu potrebno izvršiti justiranje položaja sonde, što je rezultiralo velikim gubitkom vremena. Razlike mjernih rezultata dobivenih uz korištenje stativa i rezultata mjerenja, pri kojima je kao nosač držala sonde korišten suport, su male i ne opravdavaju korištenje stativa pri mjerenju.

Karakteristike suporta omogućuju mjerenje od 50 mm naviše, i bočno prema strani obloženoj prozorima do 1250 mm i na suprotnu stranu do 1000 mm u odnosu na sredinu mjerne sekcije zračnog tunela. Ova asimetričnost je rezultat bočnog smještaja držala sonde na suportu.

#### Razdioba mjernih mjesta po visini

Gušća raspodjela mjernih mjesta u donjem dijelu graničnog sloja u odnosu na gornji dio omogućava definiranje profila brzine. To je vrlo važno s aspekta usporedbe mjernih rezultata s rezultatima iz prirode, i to naročito u području u kojem vrijedi logaritamski zakon. Podjela mjernih mjesta po visini je izvršena u skladu sa sljedećim izrazom:

$$Z_{n+1} = Z_n \cdot a = Z_1 \cdot a^n. \quad (4.1)$$

Uz zadanu visinu najnižeg mjernog mjesta  $z_1$ , debljinu simuliranog graničnog sloja  $z_N = \delta$  i broj mjernih mjesta  $N$ , koeficijent  $a$  se definira s:

$$a = N^{-1} \sqrt{\frac{z_N}{z_1}}. \quad (4.2)$$

Uz  $\delta = 1000$  mm,  $z_1 = 50$  mm i  $N = 18$  vrijede podaci iz Tablice 4.1.

Mjerno mjesto	$z$ [mm]	Mjerno mjesto	$z$ [mm]
1	50	10	244
2	60	11	291
3	71	12	347
4	85	13	414
5	101	14	494
6	121	15	589
7	144	16	703
8	172	17	838
9	205	18	1000

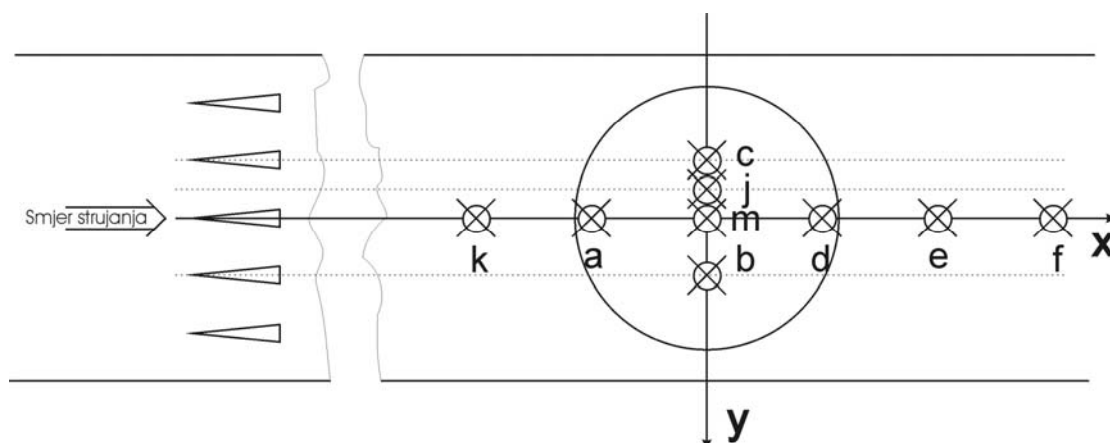
Tablica 4.1: Mjerna mjesta uz  $\delta = 1000$  mm

Dodatno su izvršena mjerenja brzine pri  $z = 1193$  mm i  $z = 1423$  mm. Na taj je način ispitan utjecaj stijenke stropa mjerne sekcije zračnog tunela na mjerne rezultate i definiran gornji rub graničnog sloja.

### Razdioba mjernih mjesta u X – Y ravnini

Bitan dio provedenih istraživanja s ciljem modeliranja atmosferskog graničnog sloja u mjernoj sekciji zračnog tunela predstavlja ispitivanje strukture graničnog sloja na različitim pozicijama unutar mjerne sekcije zračnog tunela. Na taj se način ispituje utjecaj objekata za generiranje graničnog sloja, kao i stijenki mjerne sekcije na strukturu modeliranog graničnog sloja. Stoga je izvršen niz mjerenja profila mjernih veličina na različitim pozicijama unutar xy ravnine. Na Sl 4.1 su prikazane koordinate mjernih mjesta u xy ravnini, u kojima su izvršena mjerenja profila traženih veličina, pri čemu slova označavaju slijed mjerenja. Središte rotirajuće kružne ploče (točka m) označava središte pravokutnog koordinatnog sustava ( $x = y = 0$ ).

Mjerno mjesto	$x$ [mm]	$y$ [mm]
<b>a</b>	-1000	0
<b>b</b>	0	500
<b>c</b>	0	-500
<b>d</b>	1000	0
<b>e</b>	2000	0
<b>f</b>	3000	0
<b>j</b>	0	-240
<b>k</b>	-2000	0
<b>m</b>	0	0



Sl. 4.1: Mjerna mjesta

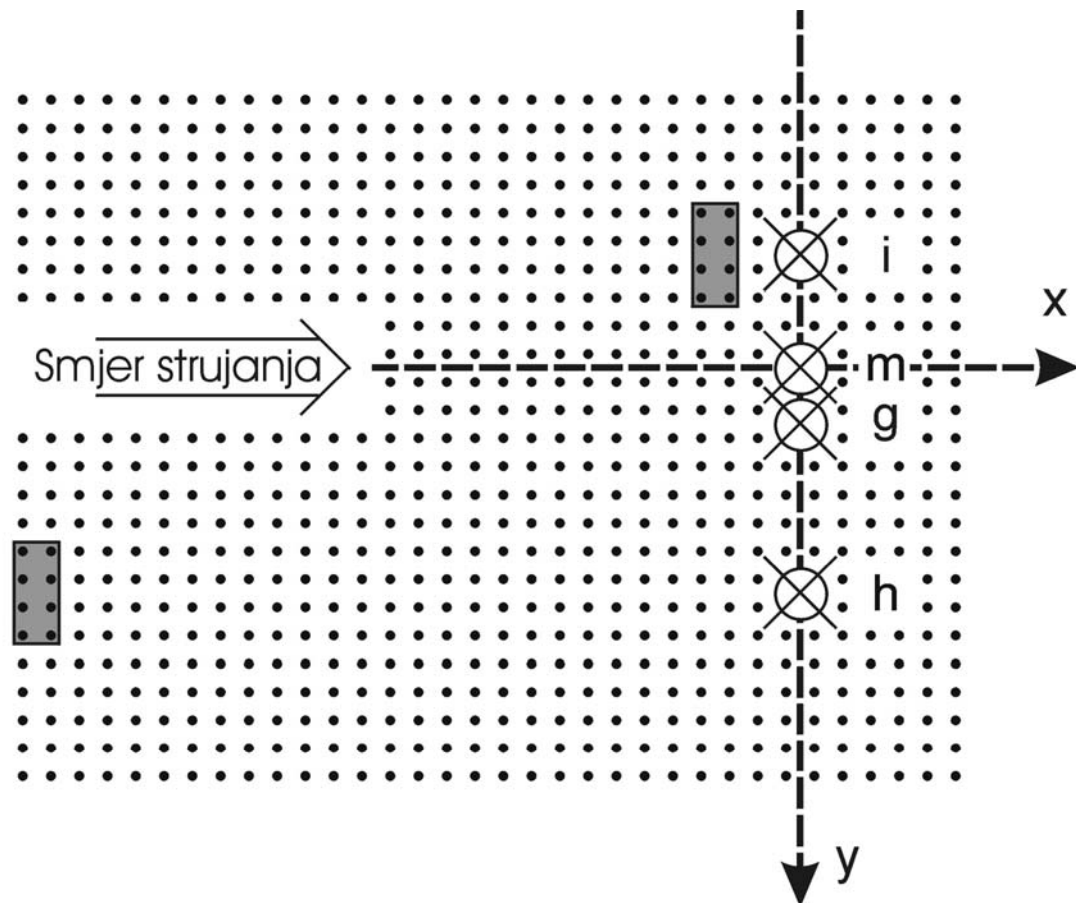
Mjerenjima u točkama b i c se ispituje simetričnost strujanja u poprečnom smjeru, odnosno postojanje Reynoldsovog tangencijalnog naprezanja u xy ravnini. Mjerenjima u točkama m (sredina mjerne sekcije zračnog tunela, nizvodno iza generatora vrtloga), j (nizvodno u odnosu na generatore vrtloga, između dva generatora vrtloga) i c (nizvodno iza generatora vrtloga) se ispituje eventualno postojanje utjecaja generatora vrtloga na profil osrednjenih brzina i intenziteta turbulencije, tj. da li se struktura graničnog sloja na dovoljno velikoj udaljenosti nizvodno od generatora vrtloga mijenja ovisno o relativnoj poziciji mjernog mjesta u odnosu na smještaj generatora vrtloga.

Mjerenjima u mjernim mjestima k, a, m, d, e, i f se ispituje proces razvoja strukture graničnog sloja u uzdužnom smjeru. Mjerenjima u mjernim mjestima g, h, i i, čije su koordinate prikazane na Sl. 4.2, se ispituje eventualni utjecaj položaja sonde u odnosu na elemente hrapavosti na strukturu graničnog sloja. U mjernom mjestu g je mjereno u sredini između dva elementa podne hrapavosti (LEGO kocke), u točki h daleko iza i u točki i neposredno iza elementa podne hrapavosti.

### Dodatno mjerenje

Provedena su dodatna mjerenja na visini  $z = 100$  mm pri  $x = 0$  uzduž y osi u razmacima od 100 mm, te pri  $y = \pm 250$  mm i  $y = \pm 750$  mm. Cilj je bio utvrđivanje konstantnosti strukture graničnog sloja u poprečnom smjeru. Ovi rezultati mjerenja služe kao dopuna rezultatima mjerenja u mjernim mjestima b, c, j i m, a prikazani su na Sl. C33.

Mjerno mjesto	x [mm]	y [mm]
<b>g</b>	0	10
<b>h</b>	0	55
<b>i</b>	0	-10



Sl. 4.2: Mjerna mjesta

## 4.2. Izvršena mjerenja

1	Kalibriranje mjerne sonde						
2	Mjerenje gradijenta tlaka pri 800 1/min						
	Podna hrapavost	Barijera	x [mm]	y [mm]	Brzina	Oznaka	Naznaka
3	R1	1	0	0	8 m/s	1108S	1)
4	R 1	1	0	0	8 m/s	1108T	2)
5	R 1	1	0	0	12 m/s	1112F	
6	Kontrola pokazivača broja okretaja na komandnoj ploči						
7	R 1	1	0	0	360 1/min	1112D	3)
8	R 1	2	0	0	400 1/min	1212	
9	R 1	3	0	0	400 1/min	1312F	
10	R 1	3	0	0	400 1/min	1312	
11	R 2	1	0	0	400 1/min	2112	
12	R 3	1	0	0	400 1/min	3112	
13	R 3	3	0	0	400 1/min	3312	
14	R 3	2	0	0	400 1/min	3212	
15	R 4	1	0	0	400 1/min	4112	
16	R 4	3	0	0	400 1/min	4312	
17	R 4	4	0	0	400 1/min	4412	
18	R 4	5	0	0	400 1/min	Krivo mjerenje	
19	R 4	6	0	0	400 1/min	4612	
20	R 4	5	0	0	400 1/min	4512	
21	R 4	5	-1000	0	400 1/min	Krivo mjerenje	

22	R 4	5	0	500	400 1/min	Krivo mjerenje	
23	R 4	5	0	0	400 1/min	45i12	4)
24	R 4	5	-1000	0	400 1/min	45a12	
25	R 4	5	0	500	400 1/min	45b12	
26	R 4	5	0	-500	400 1/min	45c12	
27	R 4	5	1000	0	400 1/min	45d12	
28	R 4	5	2000	0	400 1/min	45e12	
29	R 4	5	3000	0	400 1/min	45f12	
30	R 4	5	0	10	400 1/min	45g12	
31	R 4	5	0	55	400 1/min	45h12	
32	R 4	5	0	-40	400 1/min	45i12	
33	R 4	5	0	-240	400 1/min	45j12	
34	R 4	5	-2000	0	400 1/min	45k12	
35	R 4	7	0	0	400 1/min	47i12	
36	R 4	8	0	0	400 1/min	48i12	
37	R 4	9	0	0	400 1/min	49i12	
38	R 4	10	0	0	400 1/min	410i12	
39	R 4	11	0	0	400 1/min	411i12	
40	R 4	5	0	z=100	400 1/min		

- 1) Mjerenje sa stativom
- 2) Odavde nadalje mjerenja sa suportom
- 3) Odavde nadalje regulacija broja okretaja aksijalnog ventilatora
- 4) Novo kalibriranje sonde za mjerenje brzine (užarene žice)

Tablica 4.2: Pregled izvršenih mjerenja

### 4.3. Obrada i prikaz rezultata mjerenja

Izlazni naponi anemometra su snimljeni i pohranjeni uz pomoć mjernog software-a "Tripel" na osobnom računalu (u svakoj mjernoj točki jedna datoteka).

Na računalu Power-Mac-7100/66 su uz pomoć programa "Look" obrađeni izlazni naponi anemometra korištenjem rezultata kalibriranja "look.dat". Interpolacijom dobivenih podataka nastaju dvije datoteke i to "ime\_1" i "ime\_2" koje sadržavaju vrijednosti svih podataka obuhvaćenih mjerenjem. Datoteka "ime\_1" sadrži mjerne vrijednosti prikazane u tabličnoj formi; primjer je prikazan na Sl. B1. U navedenoj su datoteci dane  $x$ ,  $y$  i  $z$  koordinate mjernih točaka, a u svakoj pojedinoj točki vrijednosti brzina  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  i  $\bar{w}$ , korelacije  $\overline{u'u'}$ ,  $\overline{v'v'}$ ,  $\overline{w'w'}$ ,  $\overline{u'v'}$ ,  $\overline{u'w'}$ ,  $\overline{v'w'}$ , vrijednosti  $k$  i  $\epsilon$ , te vrijednosti  $t_u$ ,  $t_v$  i  $t_w$ , koje pomnožene s mjerilom i brzinom  $\bar{u}$  na istoj visini predstavljaju integralne duljinske mjere turbulencije u smjeru koordinatnih osi  $x$ ,  $y$  i  $z$ .

Datoteka "ime\_2" predstavlja vremenski niz mjernih vrijednosti. U međuvremenu su ovi programi prilagođeni i za korištenje na osobnom računalu (PC).

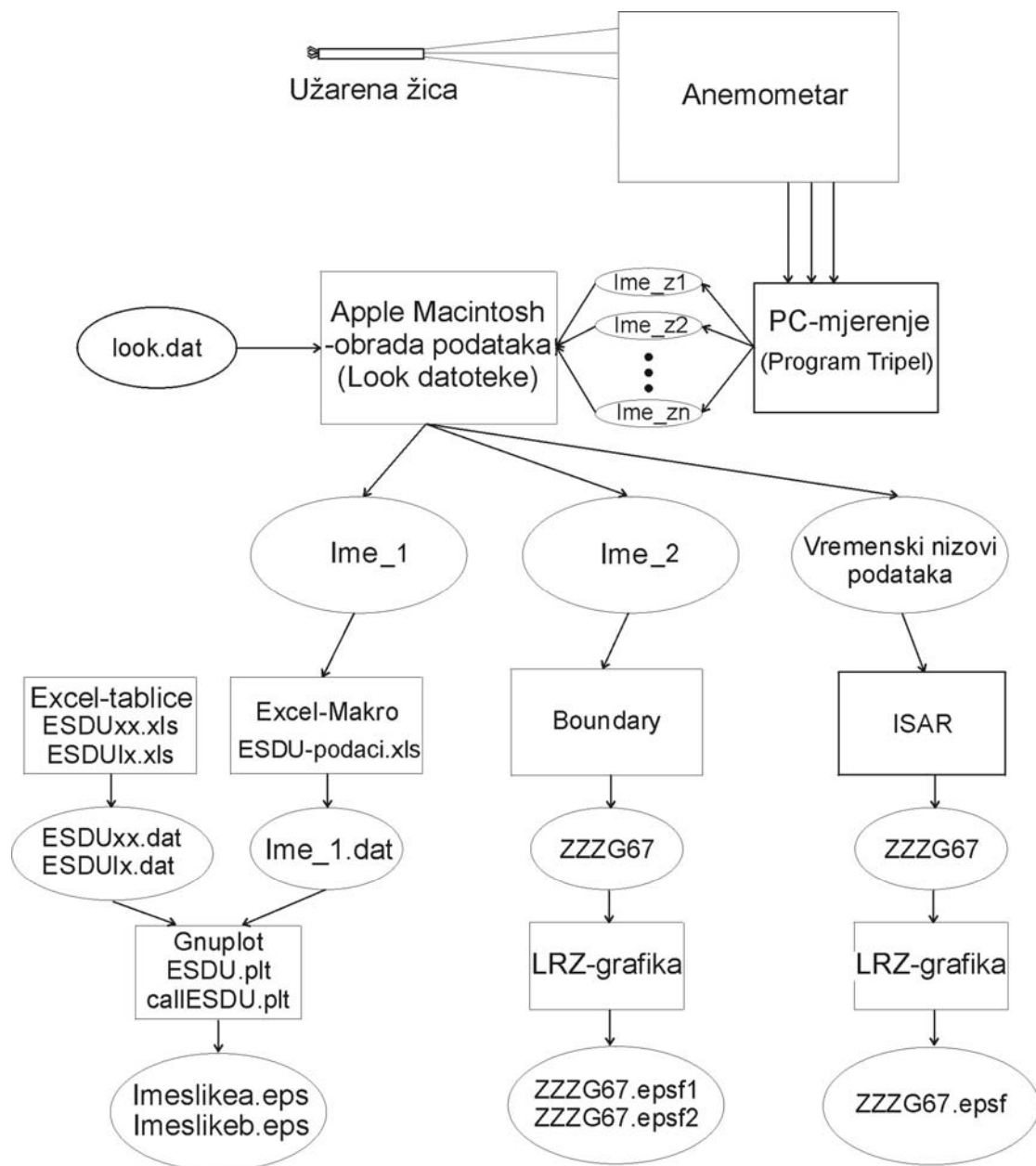
Datoteka "ime\_2" služi kao baza podataka za program "Boundary", prema [38], kojim se iz izmjerenih vrijednosti izračunavaju vrijednosti eksponenta zakona potencije  $\alpha$ , duljina hrapavosti  $z_0$  i brzina trenja  $u_\tau$ . Izmjerene i aproksimirane vrijednosti, kao i ESDU vrijednosti dobivene mjerenjima u prirodi, prema [14], [16] i [20], koje služe za usporedbu su grafički prikazane u datoteci "ZZZG67".

U datoteci "ZZZG67" prikazani su:

- Profili osrednjenih brzina u x, y i z smjeru normirani s osrednjenom vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru pri  $z = \delta$ . Pritom su rezultati mjerenja označeni križićima. Puna linija u dijagramu u kojem su prikazane osrednjene vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru predstavlja aproksimirani zakon potencije.
- Profili intenziteta turbulencije u x, y i z smjeru. Normiranje je izvršeno s osrednjenom vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru pri  $z = \delta$ . Punim linijama su označene granice pojasa unutar kojeg bi se očekivano trebali nalaziti rezultati mjerenja. Korištenjem rezultata mjerenja iz prirode različitih autora, određena je srednja vrijednost intenziteta turbulencije na različitim visinama za svaki pojedini tip terena, prema [20]. Pune linije predstavljaju vrijednosti koje za  $\pm 15\%$  (x i z smjer), odnosno  $\pm 20\%$  (y smjer) odstupaju od navedenih rezultata mjerenja iz prirode, prema [38].
- Promjena iznosa korelacija  $\overline{u'v'}$ ,  $\overline{u'w'}$  i  $\overline{v'w'}$  s promjenom visine iznad podloge. Normiranje je izvršeno s osrednjenom vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru pri  $z = \delta$ .
- Promjena osrednjenih vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru ovisno o visini iznad podloge, koja je prikazana u logaritamskom mjerilu. Na taj se način ispituje podudarnost rezultata mjerenja s teoretskim logaritamskim zakonom u donjem dijelu graničnog sloja.
- Profili integralne duljinske mjere turbulencije u x, y i z smjeru. Rezultati mjerenja su označeni križićima. Punim linijama su označene granice pojasa unutar kojeg bi se očekivano trebali nalaziti rezultati mjerenja i predstavljaju vrijednosti koje za  $\pm 30\%$  odstupaju od osrednjenih vrijednosti rezultata mjerenja iz prirode, prema [14], [16], [20] i [38].

Grafički pregled postupaka prikupljanja i obrade podataka je prikazan na Sl. 4.3.





Sl. 4.3: Mjerenje i obrada mjernih podataka

## 4.4. Rezultati mjerenja

### 4.4.1. Kalibriranje sonde za mjerenje statičkog tlaka

Kalibriranje sonde za mjerenje statičkog tlaka u stropu mjerne sekcije zračnog tunela je u Tablici 4.2 označeno kao mjerenje broj 1. Kao referentni tlak uzima se vrijednost očitana na Betzovom manometru. Rezultati mjerenja su prikazani tablicom B1. Pravac povučen kroz mjerna mjesta koja predstavljaju rezultate kalibriranja je definiran izrazom:

$$\Delta p = (9.9961 U[V] - 0,2306) \text{ [Pa]}. \quad (4.26)$$

Maksimalno odstupanje izmjerenih vrijednosti u odnosu na aproksimirani pravac pri postupku kalibracije iznosi  $3,05 \cdot 10^{-3}$  Pa uz mjerno područje  $-10 \text{ V} \dots 10 \text{ V}$ .

### 4.4.2. Kalibriranje pokazivača broja okretaja aksijalnog ventilatora

Pri nagibu skretnih lopatica od  $11,5^\circ$  su izvedeni sljedeći izrazi:

$$v = (0,0367 \cdot n - 1,1459) \text{ [m/s]}, \quad (4.27)$$

odnosno

$$n = \frac{v + 1,1459}{0,0367} \cdot \frac{1}{\text{min}}, \quad (4.28)$$

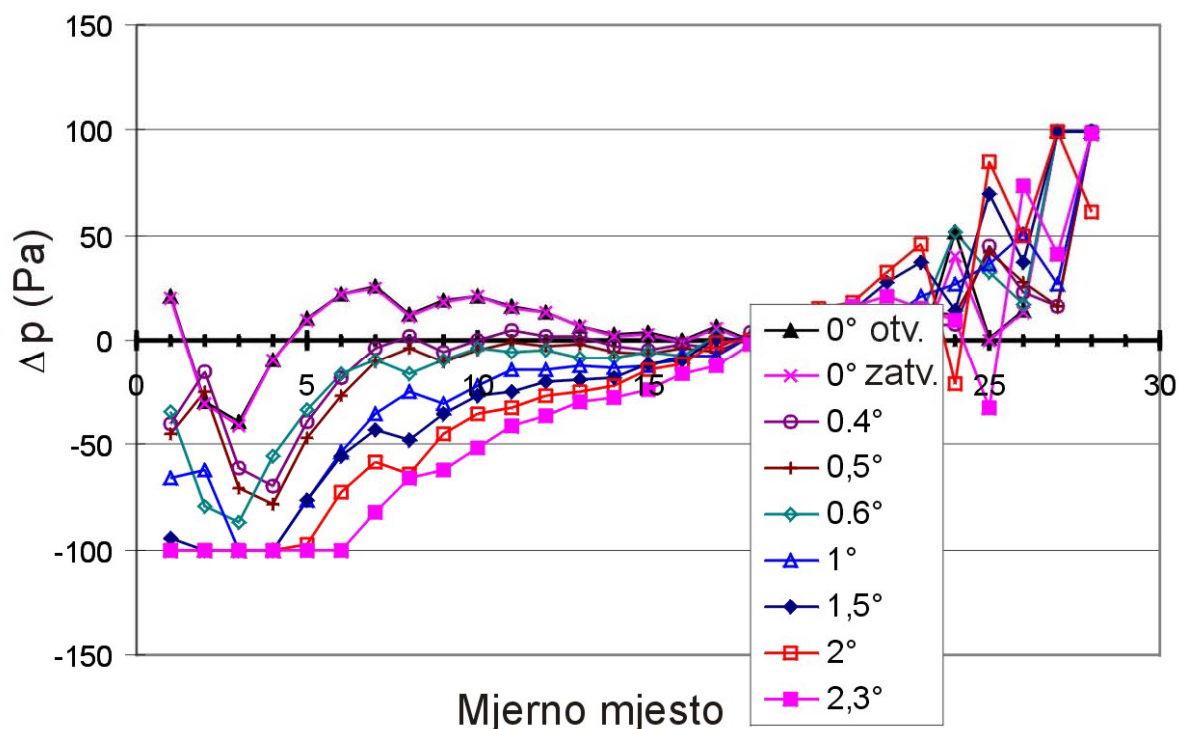
koji definiraju ovisnost brzine izmjerene Prandtl sondom i broja okretaja na pokazivaču komandne ploče s ciljem eliminiranja utjecaja hidrometrijskog krila i držala hidrometrijskog krila pri regulaciji brzine. Mjerenja su izvršena na visini 1 m iznad poda mjerne sekcije zračnog tunela na hidrometrijskom krilu i Prandtl sondi, koji su paralelno smješteni. Prilikom mjerenja su se u mjernoj sekciji zračnog tunela nalazili elementi potrebni za generiranje graničnog sloja (početni uvjeti su podna hrapavost R1 i barijera 1).

### 4.4.3. Mjerenje statičkog tlaka u stropu mjerne sekcije zračnog tunela

Rezultati mjerenja razlike tlaka između pojedinih mjernih mjesta i mjernog mjesta 18 na stropu mjerne sekcije zračnog tunela pri 800 1/min aksijalnog ventilatora ( $v = 28,21 \text{ m/s}$ ) su prikazani Tablicom B2 i Sl. 4.4. Prilikom mjerenja su se u mjernoj sekciji zračnog tunela nalazili objekti potrebni za generiranje graničnog sloja.

Rezultati mjerenja pri nagibu stropa mjerne sekcije zračnog tunela  $0^\circ$  su izvedeni pri nepotpuno izoliranoj rotirajućoj kružnoj ploči, dok su sva preostala mjerenja izvedena pri potpuno izoliranoj rotirajućoj kružnoj ploči. Može se primijetiti da se ne javljaju bitna odstupanja među rezultatima mjerenja pri potpuno i nepotpuno izoliranoj rotirajućoj kružnoj ploči.

Prilikom svih mjerenja, osim pri nagibu stropa mjerne sekcije zračnog tunela  $0,4^\circ$  i  $0,6^\circ$ , je mjerno mjesto 24 bilo prekriveno ljepljivom trakom koja potiče još iz faze izgradnje zračnog tunela, pa rezultati mjerenja u toj točki nisu vjerodostojni. Mjerno mjesto 28 je pri svim mjerenjima bilo prekriveno ljepljivom trakom.



Sl. 4.4: Razlike tlaka u odnosu na mjerno mjesto 18 pri različitim nagibima stropa mjerne sekcije zračnog tunela

U početnom se dijelu mjerne sekcije zračnog tunela nalaze objekti potrebni za generiranje graničnog sloja. Oni povećavaju stupanj začepjenosti mjerne sekcije zračnog tunela na početku mjerne sekcije, što rezultira lokalnim povećanjem brzine strujanja zraka u aksijalnom smjeru i padom statičkog tlaka na stropu mjerne sekcije zračnog tunela. Strop mjerne sekcije zračnog tunela se nakon postupnog podizanja duž mjerne sekcije zračnog tunela pod određenim konstantnim kutom naglo spušta prema dolje nakon posljednjeg mjernog mjesta. Također je tijekom mjerenja statičkog tlaka na stropu mjerne sekcije zračnog tunela na kraju mjerne sekcije smješten i suport, što rezultira lokalnim povišenjem iznosa statičkog tlaka na kraju mjerne sekcije. Iza mjernog mjesta br. 20 pod mjerne sekcije zračnog tunela u uzdužnom smjeru nije prekriven podnom hrapavosti. Stoga je stupanj začepjenosti mjerne sekcije zračnog tunela u tom dijelu mjerne sekcije manji u odnosu na dio u kojem je pod prekriven podnom hrapavosti, što uzrokuje dodatni prirast statičkog tlaka na stropu mjerne sekcije zračnog tunela iza mjernog mjesta br. 20. Pri kutu nagiba stropa mjerne sekcije zračnog tunela od  $0,5^\circ$  je gradijent statičkog tlaka na stropu mjerne sekcije zračnog tunela između mjernih mjesta 7 i 20 minimalan ( $\Delta p \leq \pm 5 \text{ Pa}$ ), i osjetno je manji od dopuštenih vrijednosti, prema 2.37,

$$\frac{\delta p}{\delta x} \leq \frac{0.05 \cdot \frac{1}{2} \rho \bar{u}_s^2}{\delta} = 22.28 \text{ Pa/m}, \quad (4.29)$$

uz

$$\rho = 1.12 \text{ kg/m}^3,$$

$$\delta = 1 \text{ m},$$

$$\bar{u}_\delta = 28.21 \text{ m/s}.$$

#### 4.4.4. Modeliranje graničnog sloja

Varijacijom strukture podne hrapavosti (visine i gustoće raspodjele), visine barijere, te visine i oblika ispupčenja na barijeri moguće je utjecati na strukturu modeliranog graničnog sloja. Proveden je čitav niz eksperimenata uz različite kombinacije gore navedenih parametara, kako je prikazano na Sl. 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 i 4.9. Struktura traženog graničnog sloja s eksponentom zakona potencije  $\alpha = 0.22$  je najtočnije modelirana pri R4 tipu podne hrapavosti, visini barijere od 127 mm i visini ispupčenja na barijeri 41 mm.

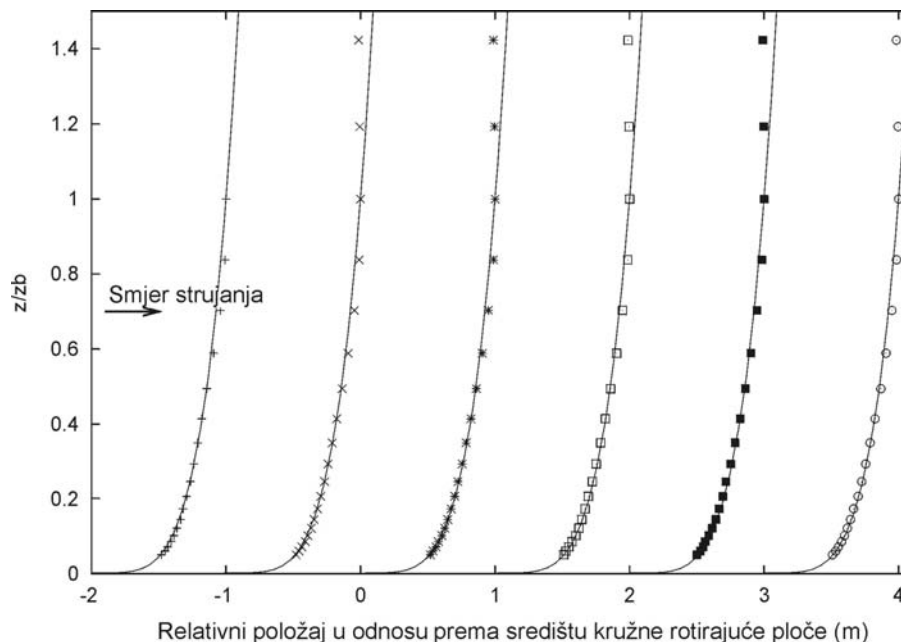
Na Sl. 4.6 su prikazane promjene profila osrednjenih vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru ovisno o visini barijere i tipu podne hrapavosti. Povećanjem duljine hrapavosti  $z_0$  (povećanjem visine ili gustoće raspodjele elemenata hrapavosti) smanjuje se iznos osrednjene vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru na konstantnoj visini u donjem dijelu graničnog sloja ( $z/z_{\text{ref}} \leq 0.6$ ). U gornjem dijelu graničnog sloja ( $z/z_{\text{ref}} \geq 0.6$ ) je utjecaj podne hrapavosti na profil osrednjenih vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru vrlo mali, tj. odstupanja osrednjenih vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru na istoj visini u ovisnosti o tipu podne hrapavosti su u gornjem dijelu graničnog sloja zanemariva. Izvan graničnog sloja ( $z/z_{\text{ref}} \geq 1$ ) je promjena osrednjene vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru s visinom zanemariva i vrlo se dobro podudara s teoretskim razmatranjima, prema [39]. S povećanjem visine barijere smanjuje se iznos količine gibanja struje zraka unutar graničnog sloja, pri čemu je ova pojava izraženija u donjem dijelu graničnog sloja.

Na Sl. 4.7 su prikazani profili osrednjenih vrijednosti brzine i intenziteta turbulencije u aksijalnom smjeru, kao i  $\overline{u'w'}$  korelacije pri različitim visinama barijere. Visina barijere je varirana u koracima od 10 mm, a visina (41 mm) i oblik ispupčenja na barijeri, kao i tip podne hrapavosti (R4) su konstantni. Utjecaj promjene visine barijere na profil osrednjenih brzina u aksijalnom smjeru već je opisan primjerom prikazanim na Sl. 4.6. Intenzitet turbulencije u aksijalnom smjeru povećava se s povišenjem barijere, a rezultati mjerenja u zračnom tunelu odgovaraju rezultatima mjerenja u prirodi, prema [20]. Utjecaj promjene visine barijere na iznose intenziteta turbulencije u aksijalnom smjeru je veći u donjem dijelu graničnog sloja ( $z/z_{\text{ref}} \leq 0.6$ ), tj. odstupanja izmjerenih vrijednosti intenziteta turbulencije na istoj visini su u donjem dijelu graničnog sloja pri različitim visinama barijere osjetno veća u odnosu na odstupanja izmjerenih vrijednosti intenziteta turbulencije u gornjem dijelu graničnog sloja ( $z/z_{\text{ref}} \geq 0.6$ ). Iznos  $\overline{u'w'}$  korelacije u neposrednoj blizini podloge ( $z/z_{\text{ref}} \leq 0.1$ ) se ne mijenja s promjenom visine barijere i konstantan je u cijelom navedenom području. S povećanjem visine barijere se granica, do koje je iznos  $\overline{u'w'}$  korelacije konstantan, pomiče u gornje dijelove graničnog sloja. Tako je npr. pri eksperimentu, u kojem je primijenjena barijera visine 107 mm, iznos  $\overline{u'w'}$  korelacije konstantan do visine  $z/z_{\text{ref}} = 0.1$ , a pri eksperimentu u kojem je primijenjena barijera visine 147 mm je navedeni iznos konstantan čak do

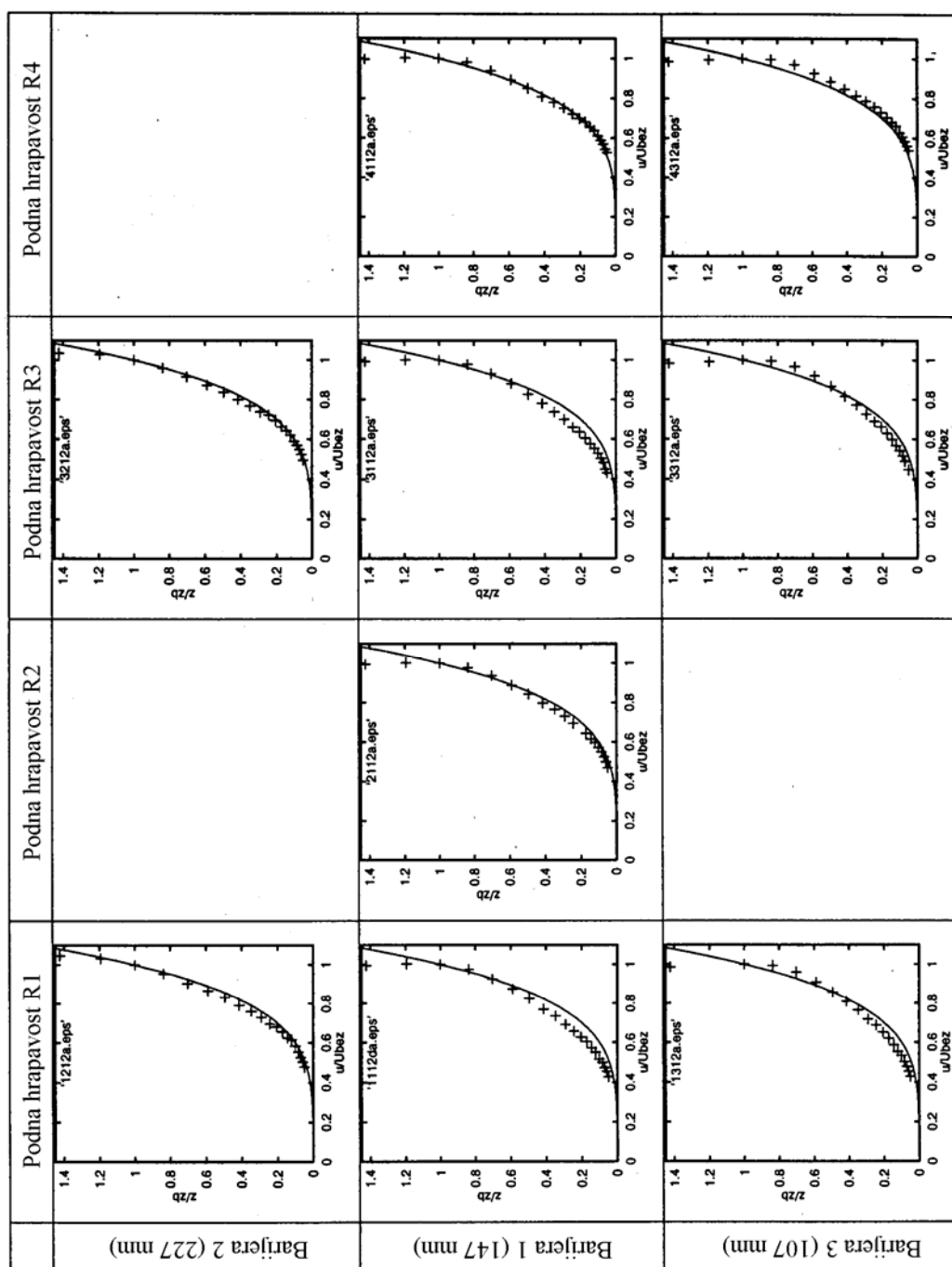
$z/z_{\text{ref}} = 0.6$ . Sličan utjecaj na profil  $\overline{u'w'}$  korelacije u prirodi ima promjena tipa podne hrapavosti (s povećanjem duljine hrapavosti  $z_0$  povećava se područje konstantnosti iznosa  $\overline{u'w'}$  korelacije), prema [40].

Na Sl. 4.8 su prikazani profili osrednjenih vrijednosti brzine i intenziteta turbulencije u aksijalnom smjeru, kao i  $\overline{u'w'}$  korelacije pri različitim visinama ispupčenja na barijeri. Visina barijere (107 mm) i tip podne hrapavosti (R4) su konstantni. Odabrana je barijera visine 107 mm, pošto rezultati mjerenja u navedenom slučaju najbolje odgovaraju rezultatima mjerenja u prirodi, prema [14], [16], [20] i [40]. S povišenjem ispupčenja na barijeri smanjuju se osrednjene vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru u donjem dijelu graničnog sloja, a iznosi intenziteta turbulencije u aksijalnom smjeru u donjem dijelu graničnog sloja postaju veći. S povećanjem visine ispupčenja na barijeri se granica, do koje je iznos  $\overline{u'w'}$  korelacije konstantan, pomiče u gornje dijelove graničnog sloja. Može se primijetiti, da se promjenom visine ispupčenja na barijeri ostvaruje sličan učinak kao i pri promjeni visine barijere.

Na Sl. 4.5 je prikazan razvoj profila osrednjenih vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru duž mjerne sekcije zračnog tunela ( $y = 0$ ). Kao što se može primijetiti, granični je sloj u sredini mjerne sekcije ( $x \geq -2\text{ m}$ ,  $y = 0$ ) potpuno izobražen. Među rezultatima mjerenja izvršenim 2 m i 1 m ispred središnje točke mjerne sekcije zračnog tunela (središte rotirajuće kružne ploče) postoji određena razlika u donjem dijelu profila brzine ( $z/z_{\text{bez}} < 0.2$ ), dok su rezultati ostalih mjerenja gotovo identični, pa se može zaključiti da se nizvodno od točke  $x = -1\text{ m}$ ;  $y = 0\text{ m}$  granični sloj nalazi u stanju ravnoteže.

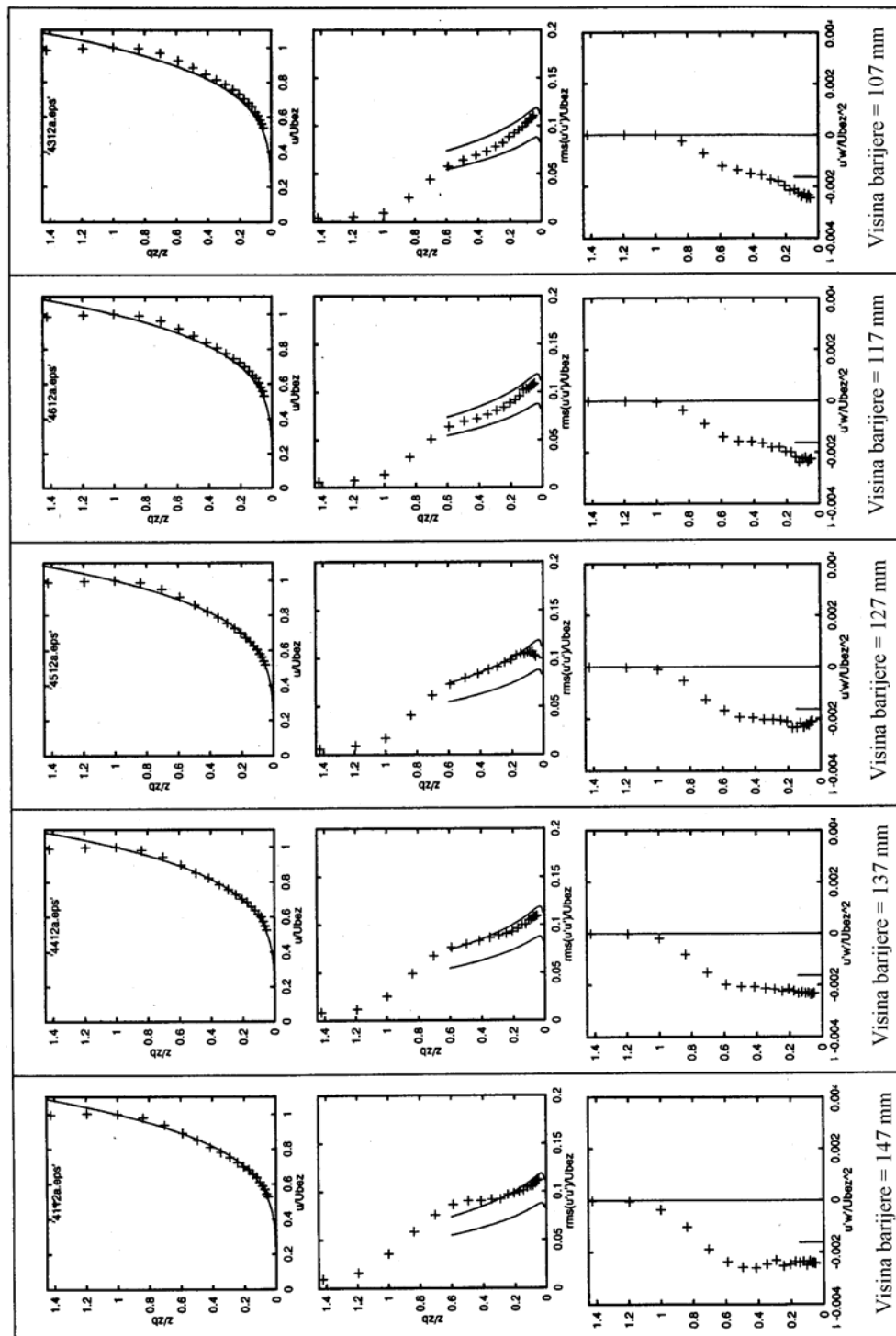


Sl. 4.5: Razvoj graničnog sloja duž mjerne sekcije zračnog tunela



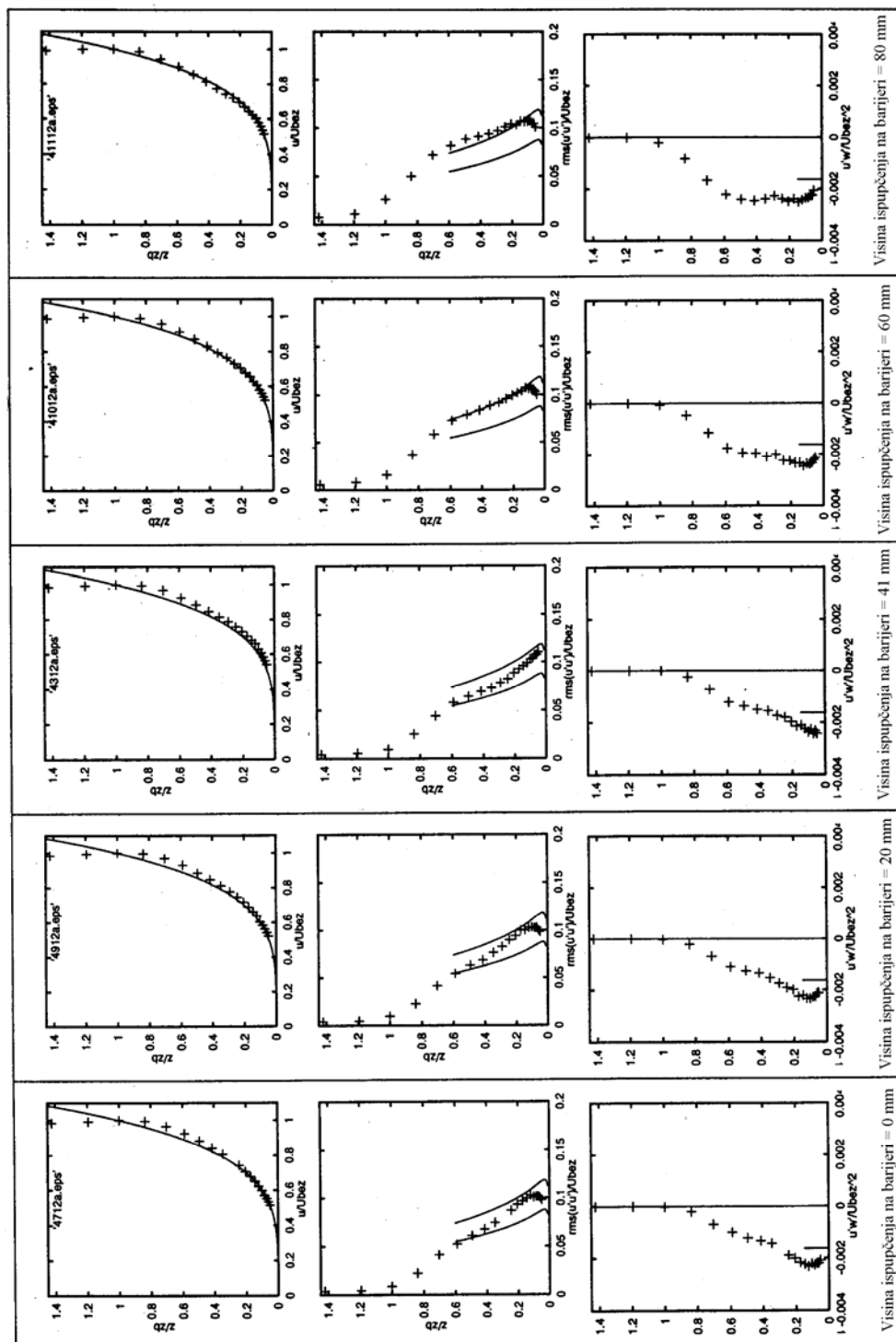
Sl. 4.6: Profili osrednjenih vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru uz varijacije visine barijere i tipa podne hrapavosti (visina ispupčenja na barijeri = 41 mm)

Sl. 4.6: Profili osrednjenih vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru uz varijacije visine barijere i tipa podne hrapavosti (visina ispupčenja na barijeri = 41 mm)



Sl. 4.7: Mjerni rezultati uz varijacije visine barijere pri konstantnoj podnoj hrapavosti R4 (visina ispupčenja na barijeri = 41 mm)

Sl. 4.7: Mjerni rezultati uz varijacije visine barijere pri konstantnoj podnoj hrapavosti R4 (visina ispupčenja na barijeri = 41 mm)

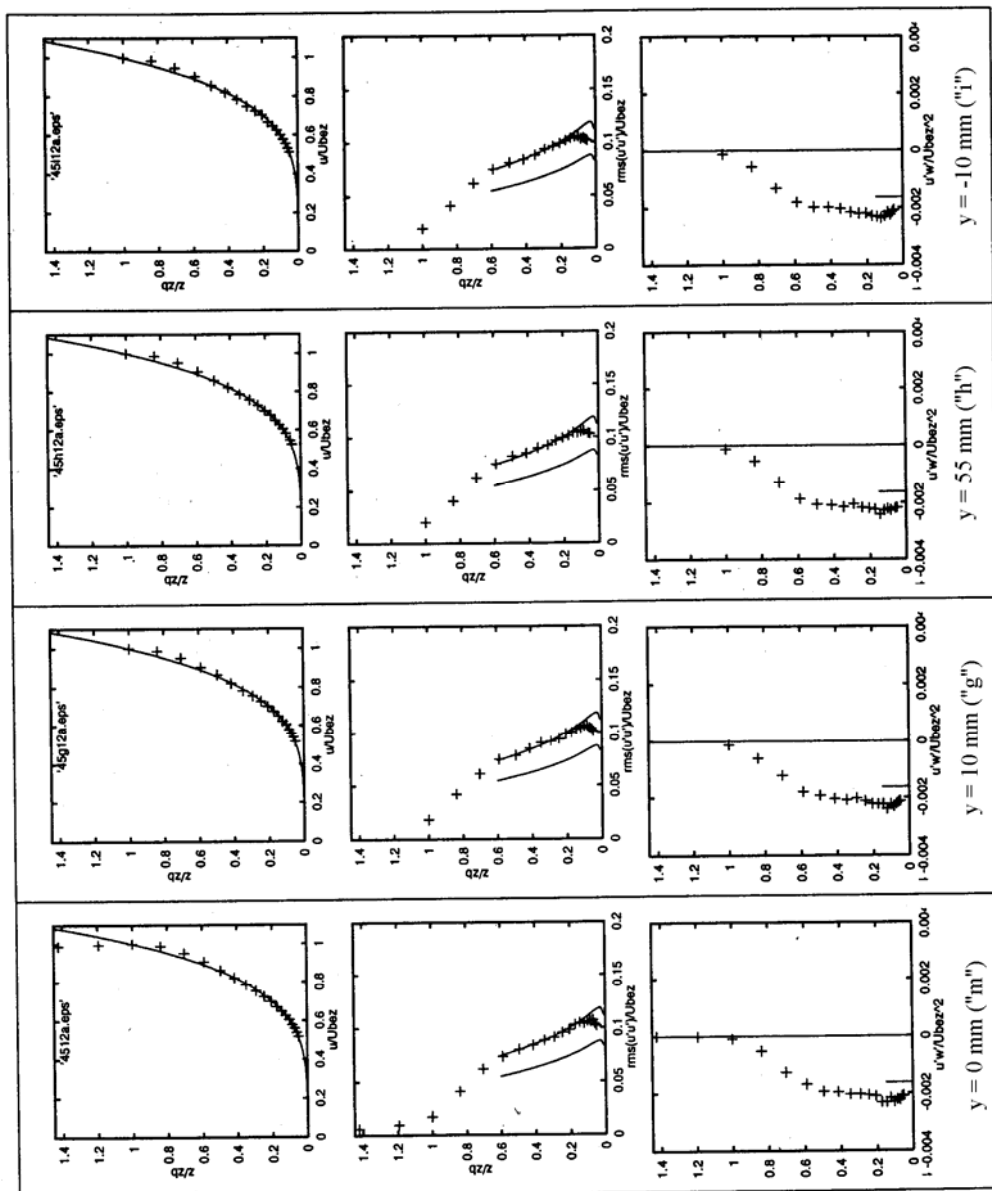


Sl. 4.8: Mjerni rezultati uz varijacije visine ispušćenja na barijeri pri konstantnoj podnoj hrapavosti R4 (visina barijere = 107 mm)

Sl. 4.8: Mjerni rezultati uz varijacije visine ispušćenja na barijeri pri konstantnoj podnoj hrapavosti R4 (visina barijere = 107 mm)



Sl. 4.9: Utjecaj mjerne pozicije u odnosu na elemente podne hrapavosti na rezultate mjerenja



Sl. 4.9: Utjecaj mjerne pozicije u odnosu na elemente podne hrapavosti na rezultate mjerenja

Na Sl. 4.9 je prikazan utjecaj pojedinačnih elemenata hrapavosti na strukturu graničnog sloja, tj. profile osrednjenih vrijednosti brzine i intenziteta turbulencije u aksijalnom smjeru, kao i  $\overline{u'w'}$  korelacije. Prikazani su rezultati mjerenja u točki g (u sredini između dva elementa podne hrapavosti - LEGO kocke), u točki h (nizvodno daleko od elementa podne hrapavosti), u točki i (neposredno nizvodno iza elementa podne hrapavosti) i u točki m (središte mjerne sekcije zračnog tunela).

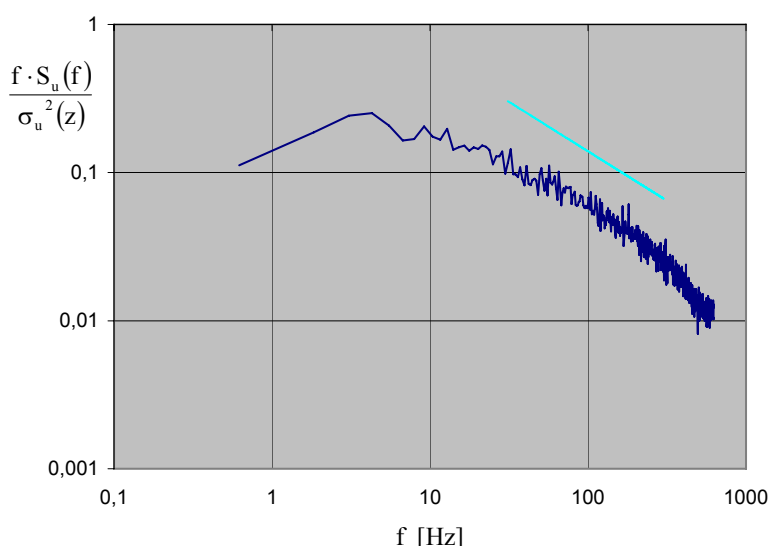
U području  $z > 50$  mm su rezultati mjerenja identični, neovisno o poziciji mjerne sonde u poprečnom smjeru mjerne sekcije zračnog tunela (između dva elementa podne hrapavosti, odnosno iza pojedinog elementa podne hrapavosti).

Pretpostavlja se da se očekivani utjecaj elemenata hrapavosti na rezultate mjerenja javlja u području  $z < 50$  mm. Nažalost ne postoji mogućnost mjerenja u tom području zbog karakteristika mjernog sustava.

U svrhu određivanja konstantnosti strukture graničnog sloja u poprečnom smjeru mjerne sekcije zračnog tunela su izvršena mjerenja uzduž y osi uz  $z = 100$  mm i  $x = 0$  mm u koracima od 100 mm, i dodatno pri  $y = \pm 250$  mm i  $y = \pm 750$  mm. Rezultati su prikazani na Sl. D33. U poprečnom se smjeru zračnog tunela, uzduž y osi, javljaju vrlo male razlike u strukturi graničnog sloja. Direktni utjecaj generatora vrtloga na strukturu graničnog sloja u području rotirajuće kružne ploče se ne može uočiti.

#### 4.4.5. Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije

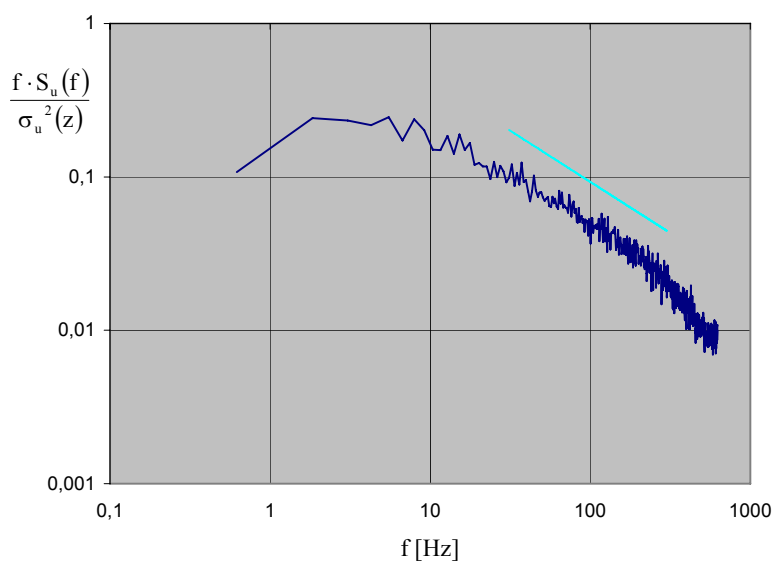
Profil kinetičke energije turbulencije u aksijalnom smjeru se prikazuje u ovisnosti o frekvenciji  $f$ . Posebno je važno ispitati strukturu turbulencije u donjem dijelu graničnog sloja (do 100 m visine), pošto se u tom području nalaze skoro sve poznate građevine. Stoga su razmatrani spektri kinetičke energije turbulencije na visini 30 m i 100 m, prikazani na Sl. 4.10 i Sl. 4.11.



Sl. 4.10: Spektar kinetičke energije turbulencije na visini 30 m

Maksimalna vrijednost spektra kinetičke energije turbulencije se nalazi pri frekvencijama između 1 i 10 Hz. U ovom području dolazi do produkcije energije. Turbulentna struktura graničnog sloja je statički stabilnija na visini 100 m, nego na

30 m visine; maksimalne vrijednosti spektra se na visini 30 m nalaze pri nižim frekvencijama u odnosu na maksimalne vrijednosti spektra na visini 100 m. Kinetička energija turbulencije nije pri višim frekvencijama ovisna o statičkoj stabilnosti, tj. u ovom području prevladavaju inercijalne sile. Najveći vrtlozi iz područja produkcije energije se sudaraju jedni s drugima, raspadaju na sve manje i manje vrtloge, i na kraju se najmanji vrtlozi (ca. 1 mm promjera) pretvaraju svojim raspadanjem u toplinsku energiju. Rezultati mjerenja se u srednjem području spektra vrlo dobro podudaraju s teorijom Kolmogorova. Područje disipacije kinetičke energije turbulencije, odnosno pretvorbe kinetičke u toplinsku energiju se na objema visinama nalazi pri frekvencijama većim od 500 Hz.



Sl. 4.11: Spektar kinetičke energije turbulencije na visini 100 m

## 5. Zaključak

U zračnom tunelu C Katedre za Mehaniku fluida Tehničkog Sveučilišta u Münchenu Counihanovom je metodom modeliran atmosferski granični sloj sljedećih karakteristika:

- debljina graničnog sloja	$\delta = 500 \text{ m}$
- ekvivalentna hrapavost	$z_0 = 0.15 \text{ m}$
- debljina istisnuća	$d = 10 \text{ m}$
- eksponent zakona potencije	$\alpha = 0.22$
- mjerilo	1:500

Prilikom mjerenja brzine korištena je metoda užarene žice.

Pritom su korišteni:

- Barijera za generiranje vrtloga s horizontalnom osi vrtnje i redukciju iznosa količine gibanja struje zraka u donjem dijelu modeliranog graničnog sloja.
- Generatori vrtloga za generiranje vrtloga s vertikalnom osi vrtnje.
- Podna hrapavost za generiranje odgovarajuće strukture turbulencije u donjem dijelu graničnog sloja i uspostavljanje ravnotežnog graničnog sloja.

Ispitan je utjecaj promjene visine barijere, visine ispušćenja na barijeri, te visine i gustoće raspodjele elemenata podne hrapavosti na strukturu modeliranog graničnog sloja.

Ispitane su i promjene strukture modeliranog graničnog sloja u uzdužnom i poprečnom smjeru mjerne sekcije zračnog tunela, te ovisnost rezultata mjerenja o položaju mjerne sonde u odnosu prema pojedinačnim elementima podne hrapavosti i generatorima vrtloga.

Na osnovu provedenih istraživanja moguće je zaključiti sljedeće:

- Potvrđena je mogućnost modeliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu. Primjenom podne hrapavosti R4 i barijere 5 modeliran je granični sloj, koji vrlo dobro odgovara zadanim uvjetima.
- Regulacijom kuta nagiba stropa mjerne sekcije zračnog tunela moguće je kompenzirati pad statičkog tlaka duž mjerne sekcije zračnog tunela.
- Povećanjem duljine hrapavosti  $z_0$  smanjuje se iznos osrednjene vrijednosti brzine u aksijalnom smjeru na konstantnoj visini u donjem dijelu graničnog sloja ( $z/z_{\text{ref}} \leq 0.6$ ).
- S povećanjem visine barijere smanjuje se iznos količine gibanja struje zraka unutar graničnog sloja, pri čemu je ova pojava izraženija u donjem dijelu graničnog sloja.
- Intenzitet turbulencije u aksijalnom smjeru povećava se s povišenjem barijere, pri čemu je utjecaj promjene visine barijere na iznose intenziteta turbulencije u aksijalnom smjeru veći u donjem dijelu graničnog sloja ( $z/z_{\text{ref}} \leq 0.6$ ).
- Iznos  $\overline{u'w'}$  korelacije u neposrednoj blizini podloge ( $z/z_{\text{ref}} \leq 0.1$ ) se ne mijenja s promjenom visine barijere i konstantan je u cijelom navedenom području.

S povećanjem visine barijere se granica, do koje je iznos  $\overline{u'w'}$  korelacije konstantan, pomiče u gornje dijelove graničnog sloja.

- Promjenom visine ispupčenja na barijeri ostvaruje se sličan učinak kao i promjenom visine barijere.
- Nizvodno od točke  $x = -1$  m;  $y = 0$  m se granični sloj nalazi u ravnotežnom stanju.

U daljnjem radu je potrebno modelirati granični sloj u nekoliko različitih mjerila, te ispitati utjecaj promjene mjerila na strukturu modeliranog graničnog sloja. Bilo bi također vrlo korisno takva ispitivanja izvršiti za nekoliko različitih tipova atmosferskog graničnog sloja. U modeliranom je graničnom sloju tada moguće ispitati utjecaj promjene mjerila na opterećenje koje se javlja na modelima smještenim u mjernu sekciju zračnog tunela.

## Literatura

- [1] J. Counihan: The structure and the wind tunnel simulation of rural and urban adiabatic boundary layers, Symp. External Flows, University of Bristol, srpanj 1972.
- [2] J. Counihan: Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel, Atmospheric Environment, 7, 673-689, 1973.
- [3] A.G. Robins: The development and structure of simulated neutrally stable atmospheric boundary layers, Journal of Industrial Aerodynamics, 4, 71-100, 1979.
- [4] N.J. Cook: On simulating the lower third of the urban adiabatic boundary layer in a wind tunnel, Atmospheric Environment, 7, 691-705, 1973.
- [5] J.P. Schon, P. Mery: A preliminary study of the simulation of neutral atmospheric boundary layer using air injection in a wind tunnel, Atmospheric Environment, 5, 299-311, 1971.
- [6] H.M. Nagib, M.V. Morkovin, J.T. Yung, J. Tan-atichat: On modeling of atmospheric surface layers by the counter-jet technique, AIAA Journal, 14, 185-190, 1976.
- [7] H.W. Teunissen: Simulation of the planetary boundary layer in a multiple-jet wind tunnel, Atmospheric Environment, 9, 145-174, 1975.
- [8] W.H. Melbourne: Comparison of pressure measurements made on a large isolated building in full and model scale, Proc. Third Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, 253-262, 1971.
- [9] N.M. Standen: A spire array for generating thick turbulent shear layers for natural wind simulation in wind tunnels, T.R. LTR-LA-94, Nat. Aeronaut. Establishment, Ottawa, 1972.

- [10] A.R. Lloyd: The generation of shear flow in a wind tunnel, Q. Jl. R. Met. Soc., 93, 79-96, 1967.
- [11] G. Templin: Interim progress note on Simulation of Earths surface winds by artificially thickened wind tunnel boundary layers, NRC Canada LTR-LA-22, 1969.
- [12] J. Counihan: Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972, Atmospheric Environment, 9, 871-905, 1975.
- [13] H. Sockel: Aerodynamik der Bauwerke, Vieweg & Sohn, 1984.
- [14] ESDU: Characteristics of wind speed in the lower layers of the atmosphere near the ground: strong winds (neutral atmosphere), 72026, 1972.
- [15] WTG: Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik, Windtechnologische Gesellschaft WTG e.V., 1994.
- [16] ESDU: Integral length scales of turbulence over flat terrain with roughness changes, 86035, 1988.
- [17] J.A. Businger, J.C. Wyngaard, E.F. Bradley: Flux-profile relationship in the atmospheric surface layer, Journal of Atmospheric Science, 28, 181-189, 1971.
- [18] H.A. Panofsky: Summary paper for session 1, Wind structure, Proc. Fourth Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and structures, Heathrow, 3-6, 1975.
- [19] E. Simiu: Equivalent static wind loads for tall building design, Proc. ASCE, J. of the Struct. Div. 102 ST4, 719-737, 1976.

- [20] ESDU: Characteristics of atmospheric turbulence near the ground, 85020, 1985.
- [21] F. Pasquill: Wind structure in the atmospheric boundary, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., A269, 439-456, 1971.
- [22] P. Duchene-Marullaz: Effect of high roughness on the characteristics of turbulence in cases of strong winds, Proc. Of the 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Wind Eng., Fort Collins, 1, 179-194, 1979.
- [23] H. Pröpper: Zur aerodynamischen Belastung großer Kühltürme, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen, 1977.
- [24] E.J. Plate: Engineering meteorology, Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.
- [25] E.J. Plate: Aerodynamic characteristics of atmospheric boundary layers, US Atomic Energy Commission, AEC Critical Review Series, Div. of Tech. Info. TID-25465, 1971.
- [26] N.J. Cook: Determination of the model scale factor in wind-tunnel simulations of the adiabatic atmospheric boundary layer, Journal of Industrial Aerodynamics, 2, 311-321, 1977/1978.
- [27] T.R. Sundaram, G.R. Ludwig, G.T. Skinner: Modelling of the turbulence structure of the atmospheric surface layer, AIAA Journal, 10, 743-, 1972.
- [28] A.G. Robins: Wind tunnel modelling of plume dispersal, Rep. No. RMR 247, Marchwood Engineering Laboratories, Res. Div., Central Electricity Generating Board, Marchwood, 1977.



- [29] J.E. Cermak, V.E. Sandborn, E.J. Plate, G.H. Binder, H. Chuang, R.N. Meroney, S. Ito: Simulation of atmospheric motions by wind tunnel flows, Fluid Dynamic and Diffusion Lab., Tech. Rep. CER-66-17, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1966.
- [30] E. Simiu, R.H. Scanlan: Wind Effects on Structures: An Introduction to Wind Engineering, J. Wiley, New York, 1978.
- [31] A. Pernpeintner, P. Schnabel, A. Schuler, W. Theurer: Anleitung zur Durchführung von Ringversuchen für Windlastannahmen und für Ausbreitungsvorgänge in Grenzschichtwindkanälen, 1991.
- [32] N.J. Cook: The designer's guide to wind loading of building structures, BRE publ., Butterworths, 1985.
- [33] E.C. Maskell: Theory for the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel, Aeronautical Research Council, Reports and Memoranda No. 3400, London, HMSO, 1963.
- [34] R.G. Burton: Tests of a semi-automatic blockage procedure using the wall pressure signature method, Department of Aeronautical Engineering, Report GRB/1/83, Bristol, University of Bristol, 1983.
- [35] J. Counihan: An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel, Atmospheric Environment, 3, 197-214, 1969.
- [36] J. Counihan: A method of simulating a neutral atmospheric boundary layer in a wind tunnel, AGARD Conf. Proc. 43, 12, 1969.
- [37] R. Wanninger: Messung, Auswertung und Darstellung der Turbulenzstruktur in einer modellierten atmosphärischen Grenzschichtströmung, neobjavljeno, 1992.

- [38] L. Ilg: Boundary, Fortran-Quellcode zum Programm Boundary, Lehrstuhl für Fluidmechanik der TU München, 1991.
- [39] E. Truckenbrodt: Fluidmechanik, Springer-Verlag, 1980.
- [40] ESDU: Characteristics of atmospheric turbulence near the ground, 74031, 1975.
- [41] C.R. Hunt, H. Fernholz: Wind-tunnel simulation of the atmospheric boundary layer, a report on Euromech 50, Journal of Fluid Mechanics, 70/3, 543-559, 1975.
- [42] G. Matschke: Planung, Konstruktion und Berechnung eines Grenzschichtwindkanals für die Gebäudeaerodynamik, Lehrstuhl für Fluidmechanik, TU-München, 1993.
- [43] J. Klammer: Modellierung der atmosphärischen Windströmung in einem Grenzschichtwindkanal, Lehrstuhl für Fluidmechanik, TU-München, 1999.
- [44] E.J. Plate: Aerodynamic Characteristics of Atmospheric Boundary Layers, AEC Critical Review Series, 1971.
- [45] J. Maier-Erbacher, T. Elsässer: Modellierungstechniken im Windkanal, Sonderforschungsbereich 210/E/33, Universität Karlsruhe, 1986.
- [46] M. Jensen: Aerodynamik i den naturlige vind, Teknisk Forlag, Kopenhagen, 1959.
- [47] R.B. Stull: An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publishers, 1999.

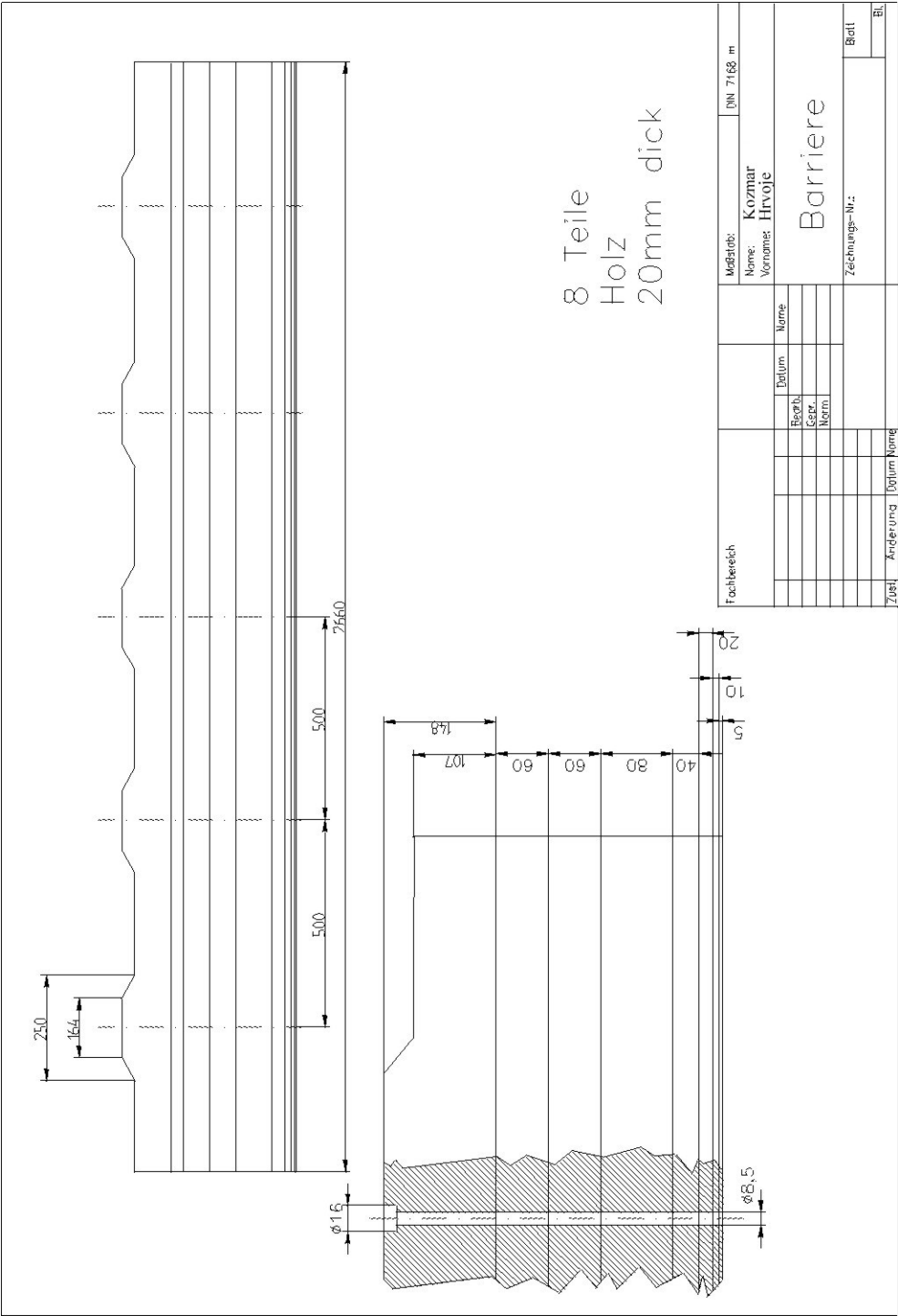
- [48] WTG: WTG-Berichte Nr. 4: Windkanalanwendungen für die Baupraxis, Wien, 1995.
- [49] VDI: VDI-Richtlinien, 3783, 1999.
- [50] J. Counihan: Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and the roughness density of three-dimensional roughness elements, *Atmospheric Environment*, 5, 637-642, 1971.
- [51] J.E. Cermak, S.P.S. Arya: Problems of atmospheric shear flows and their laboratory simulation, *AGARD Conf. Proc.*, 12, 1969.
- [52] D.J. Cockrell, B.E. Lee: Methods and consequences of atmospheric boundary layer simulation, *AGARD Conf. Proc.*, 48, 1969.
- [53] M. Wier, L. Römer: Experimentelle Untersuchung von stabil und instabil geschichteten turbulenten Plattengrenzschichten mit Bodenrauigkeit, *Z. Flugwiss. Weltraumforsch.* 11, 78-86, 1987.
- [54] Y. Jia, B.L. Sill, T.A. Reinhold: Effects of surface roughness element spacing on boundary-layer velocity profile parameters, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 73, 215-230, 1998.
- [55] E.J. Plate, J. Maier-Erbacher, R. Friedrich: The Effect of a Wall on Turbulent Flow, A Comparison of Laboratory Experiments with Wind and Water Flow over Rough Boundaries, *Proceedings 21<sup>st</sup> Congress, International Association for Hydraulic Research*, Melbourne, 5, 47-53, 1985.
- [56] N.J. Cook: Wind-tunnel simulation of the adiabatic atmospheric boundary layer by roughness, barrier and mixing-device methods, *Journal of Industrial Aerodynamics*, 3, 157-176, 1978.

- [57] H.W. Tieleman: Wind Tunnel Simulation of the Turbulence in the Surface Layer, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 36, 1309-1318, 1990.
- [58] J.E. Cermak: Laboratory Simulation of the Atmospheric Boundary Layer, *AIAA Journal*, 9, 1746-1753, 1971.
- [59] C. Farell, A.K.S. Iyengar: Experiments on the wind tunnel simulation of atmospheric boundary layers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 79, 11-35, 1999.
- [60] H.W. Tieleman, T.A. Reinhold: On the wind-tunnel simulation of the atmospheric surface layer for the study of wind loads on low-rise buildings, *Journal of Industrial Aerodynamics*, 3, 21-38, 1978.

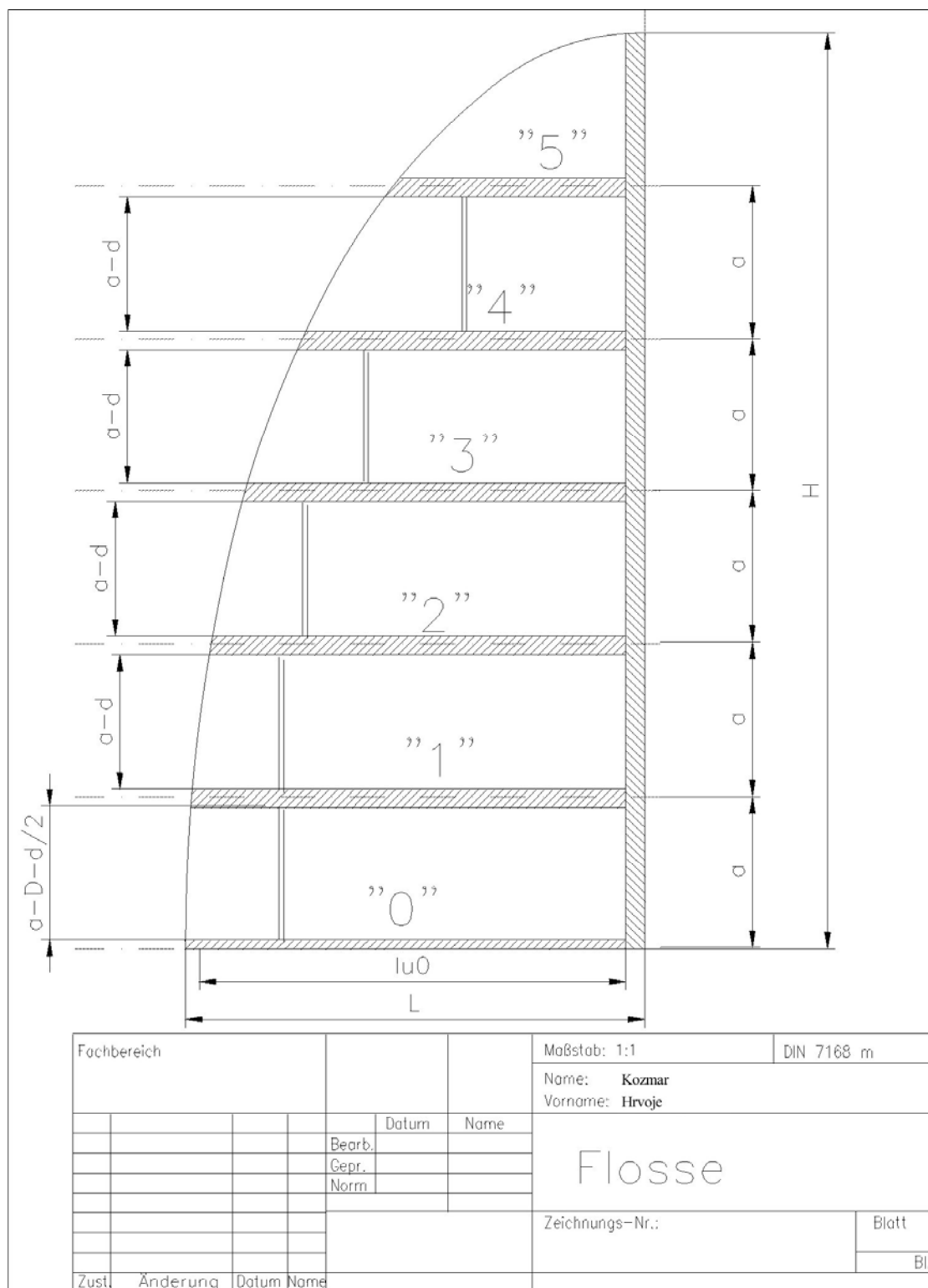
## Prilog A

Visina	Dubina	Duljina	Širina stražnje stijene	Širina stražnje stijene	Širina stražnje stijene - unutarnja	Širina stražnje stijene - unutarnja
H	L	T	B	B/2	B*	B*/2
0	500.000	502.754	102.088	51.044	98.724	49.362
50	499.375	502.125	101.956	50.978	98.593	49.296
100	497.494	500.234	101.561	50.780	98.198	49.099
150	493.343	497.066	100.899	50.449	97.535	48.768
200	489.898	492.596	99.964	49.982	96.601	48.300
250	484.123	486.790	98.750	49.375	95.387	47.693
300	476.970	479.97	97.247	48.622	93.883	46.942
350	468.375	470.955	95.440	47.720	92.077	46.038
400	458.258	460.782	93.313	46.657	89.950	44.975
450	446.514	448.974	90.845	45.422	87.481	43.741
500	433.013	435.398	88.006	44.003	84.643	42.322
550	417.582	419.982	84.763	42.381	81.399	40.700
600	400.000	402.203	81.067	40.533	77.704	38.852
650	379.967	382.060	76.586	38.428	73.492	36.746
700	357.071	359.038	72.043	36.021	68.680	34.340
750	330.719	332.541	66.503	33.252	63.140	31.570
800	300.000	301.652	60.046	30.023	56.683	28.341
850	263.391	264.842	52.351	26.175	48.987	24.494
900	217.945	219.145	42.797	21.399	39.434	19.717
950	156.125	156.985	29.802	14.901	26.439	13.219
960	140.000	140.771	26.413	13.206	23.049	11.525
970	121.552	122.222	22.535	11.267	19.171	9.586
980	99.499	100.047	17.899	8.949	14.536	7.268
990	70.534	70.922	11.810	5.905	8.447	4.223

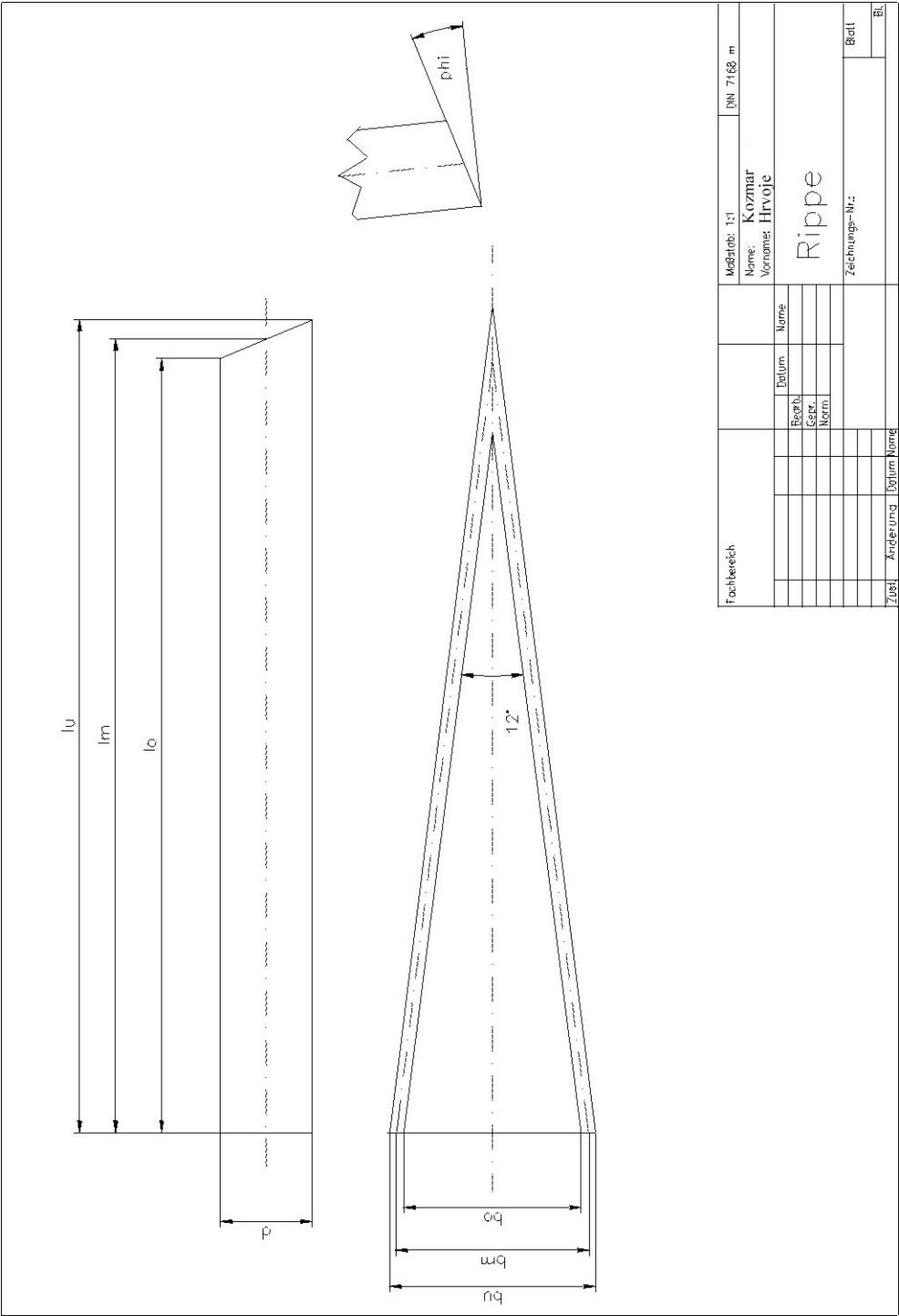
Tablica A1: Dimenzije generatora vrtloga (mm)



Sl. A1: Nacrt barijere

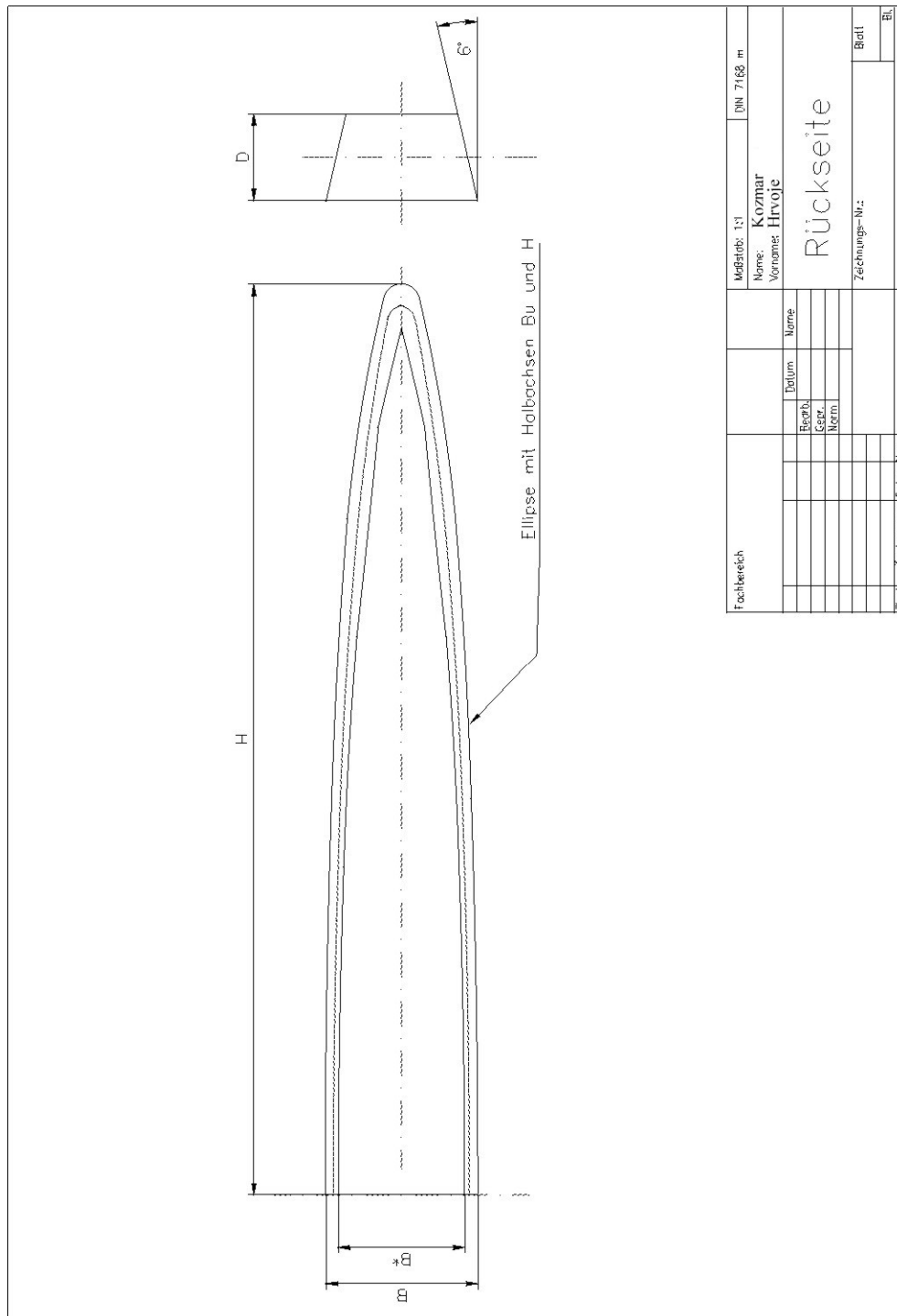


Sl. A2: Nacrt generatora vrtloga



Sl. A3: Nacrt rebra





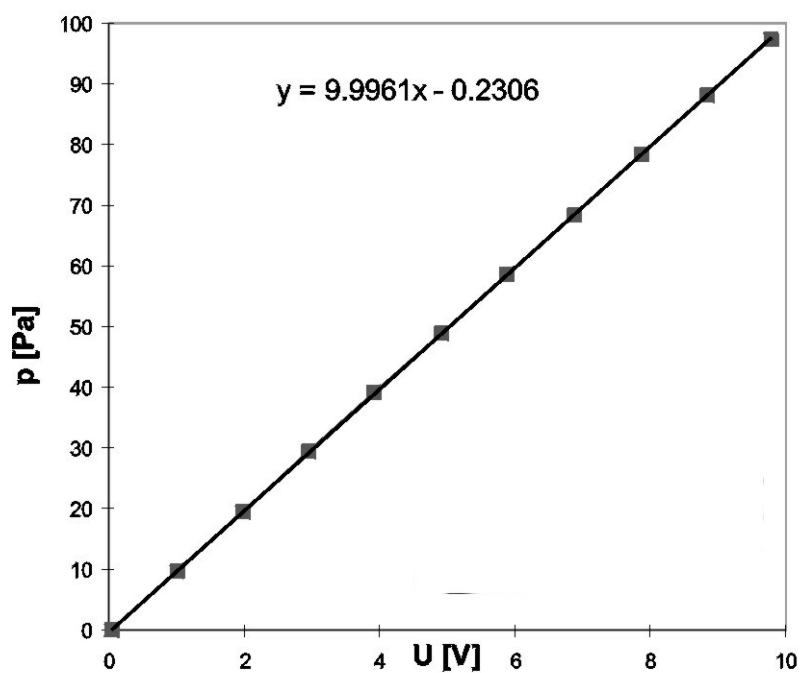
Sl. A4: Nacrt stražnje strane generatora vrtloga

Visina H:		1000 mm			
Debljina rebra d:		12 mm			
Debljina stražnje stijene D:		16 mm			
Debljina šperploče dSp:		1.5 mm			
Rebro:	0	1	2	3	4
Visina ym:	6	250	500	750	990
Visina yo:	12	256	506	756	996
Visina yu:	0	244	494	744	984
Lm	499.991	484.123	433.013	330.719	70.534
Lo	499.964	483.338	431.267	327.286	44.677
Lu	500.000	484.888	434.731	334.090	89.084
lm	469.641	453.773	402.663	300.369	40.184
lo	469.614	542.988	400.917	296.936	14.326
lu	469.650	454.537	404.381	303.740	58.734
Bm	105.102	101.767	91.023	69.520	14.827
Bo	105.097	101.602	90.656	68.798	9.391
Bu	105.104	101.927	91.384	70.229	18.726
bm	98.722	95.387	84.643	63.140	8.447
bo	98.717	95.222	84.276	62.418	3.012
bu	98.724	95.548	85.004	63.849	12.364

Tablica A2: Dimenzije rebara

## Prilog B

U (V)	p (mm stupca vode)	$\Delta p$ (Pa)	U (V)
9.797	9.95	97.4339981	9.797
8.831	9	88.1312546	8.831
7.865	8	78.338893	7.865
6.87	7	68.5465313	6.87
5.888	6	58.7541697	5.888
4.918	5	48.9618081	4.918
3.928	4	39.1694465	3.928
2.948	3	29.3770849	2.948
1.997	2	19.5847232	1.997
1.006	1	9.79236162	1.006
0.036	0	0	0.036



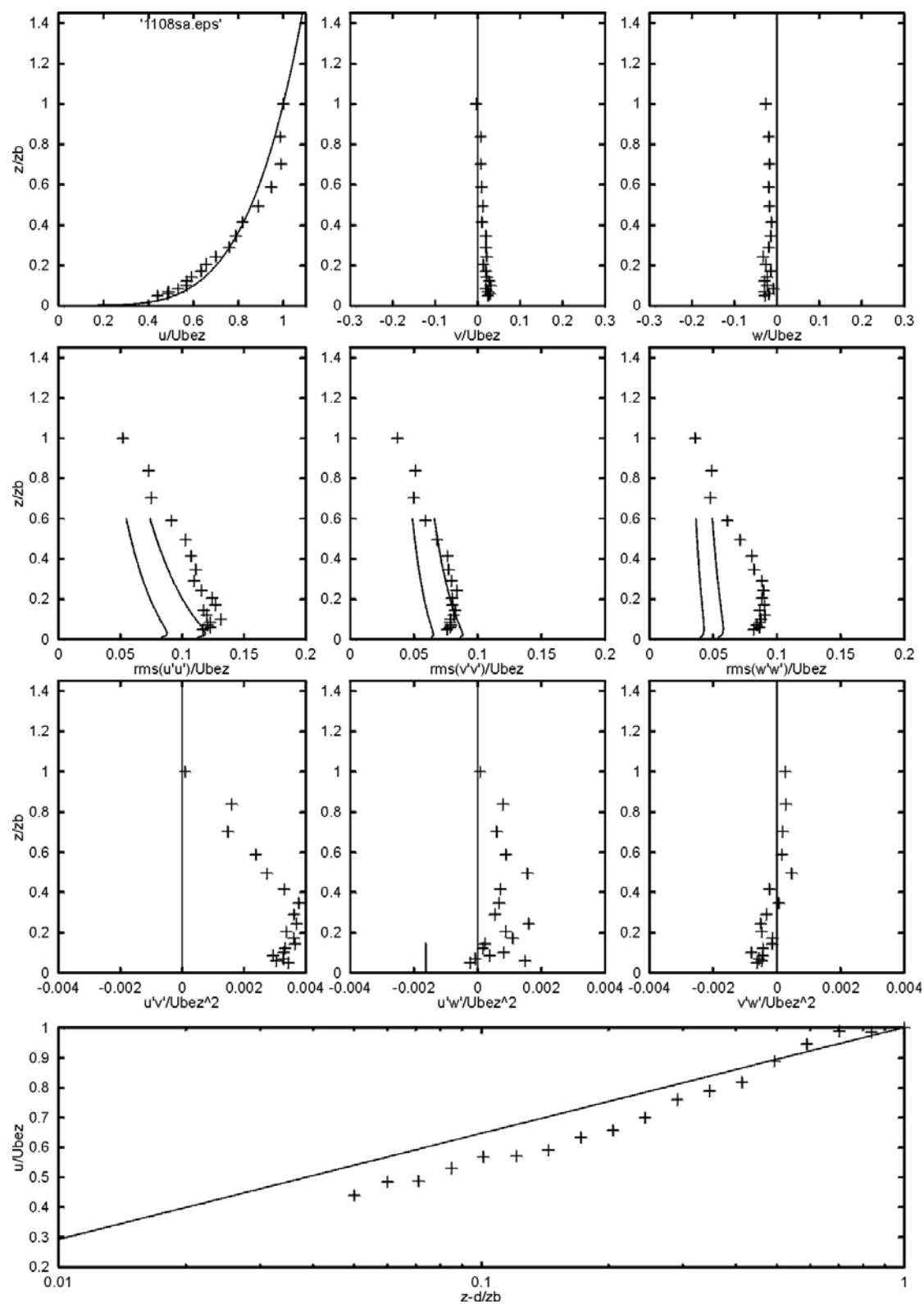
Tablica B1: Kalibracija sonde za mjerenje tlaka

Mjerno mjesto	0° otvoren	0° zatvoren	0.4°	0.5°	0.6°	1.0°	1.5°	2.0°	2.3°
1	20.71	20.51	-39.84	-45.23	-34.84	-66.34	-94.71	-100.21	-100.11
2	-30.05	-30.68	-14.94	-24.74	-79.52	-62.52	-100.21	-100.21	-100.11
3	-39.51	-40.67	-61.33	-70.52	-87.12	-100.19	-100.21	-100.21	-100.11
4	-9.38	-10.01	-69.92	-78.02	-55.83	-100.19	-100.21	-100.21	-100.11
5	10.25	9.72	-39.54	-46.63	-33.14	-76.78	-76.12	-97.21	-100.11
6	22.10	22.08	-18.44	-26.64	-16.34	-53.66	-55.23	-72.92	-100.11
7	25.92	25.19	-3.75	-10.15	-9.15	-35.35	-42.63	-57.83	-81.82
8	12.48	11.86	2.35	-3.55	-15.84	-25.10	-48.13	-64.13	-65.83
9	18.65	18.36	-5.45	-10.45	-9.85	-30.43	-34.94	-45.03	-62.43
10	21.30	20.78	0.15	-4.55	-3.95	-21.50	-26.34	-35.14	-51.33
11	16.30	15.72	5.05	-0.55	-5.65	-14.69	-24.44	-32.14	-40.63
12	13.36	13.01	1.95	-2.65	-5.05	-14.64	-19.94	-26.44	-36.44
13	7.01	6.27	1.45	-1.75	-8.45	-12.21	-19.44	-24.44	-29.94
14	2.93	2.37	-2.55	-5.35	-9.05	-13.59	-18.34	-22.14	-27.74
15	3.97	3.15	-4.45	-6.85	-5.85	-12.83	-11.75	-14.05	-23.94
16	-0.12	-0.87	-1.85	-4.15	-7.45	-7.98	-9.45	-11.35	-16.64
17	6.34	5.69	-3.75	-6.05	1.45	-7.60	0.55	-0.75	-12.85
18	0.14	-0.75	3.95	2.25	-0.95	1.50	-0.05	-0.25	-2.35
19	-5.03	-6.08	0.45	-0.15	-2.85	-0.09	2.75	4.45	-0.25
20	4.43	3.39	-2.55	-2.55	7.25	0.36	13.94	15.54	3.85
21	-3.76	-4.89	7.55	7.35	3.55	11.71	14.64	18.04	16.54
22	4.34	3.19	2.25	2.45	9.25	9.67	27.44	32.24	21.44
23	-2.76	-4.02	7.05	12.94	12.54	21.22	37.33	46.23	15.44
24	51.25	40.45	7.95	12.74	51.93	26.42	14.14	-20.54	9.65
25	0.84	-0.31	45.13	41.83	32.54	35.99	70.12	85.22	-32.54
26	14.40	13.34	23.34	27.64	17.44	50.95	36.93	49.63	73.82
27	99.72	99.72	15.84	16.04	99.71	26.36	99.71	99.71	41.23
28	99.72	99.72	99.71	99.71	99.71	99.72	99.73	61.13	98.11

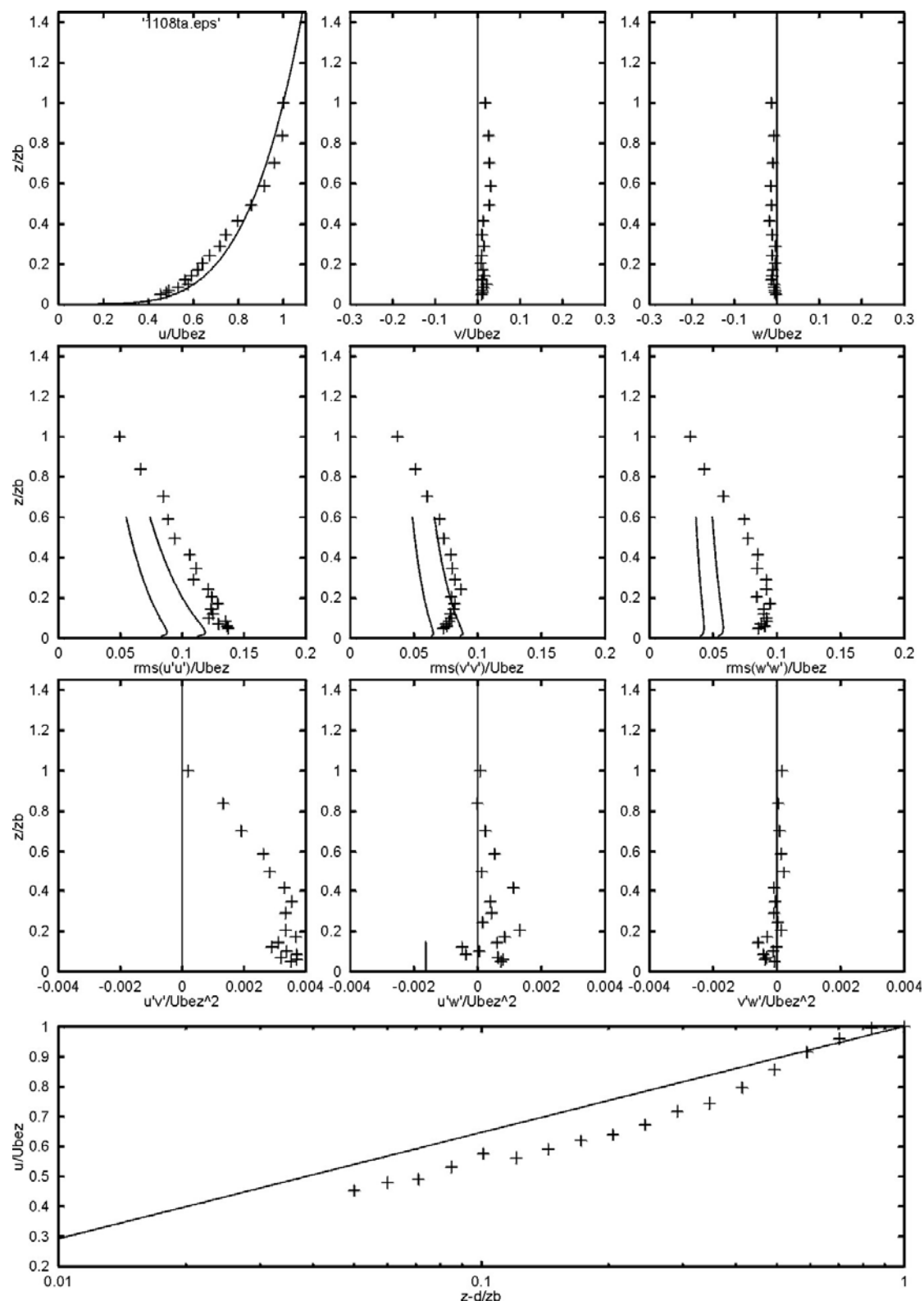
Tablica B2: Razlike tlaka između pojedinih točaka i točke 18 pri različitim nagibima stropa mjerne sekcije zračnog tunela (Pa)

Sl. B1: Primjer datoteke **ime\_1**

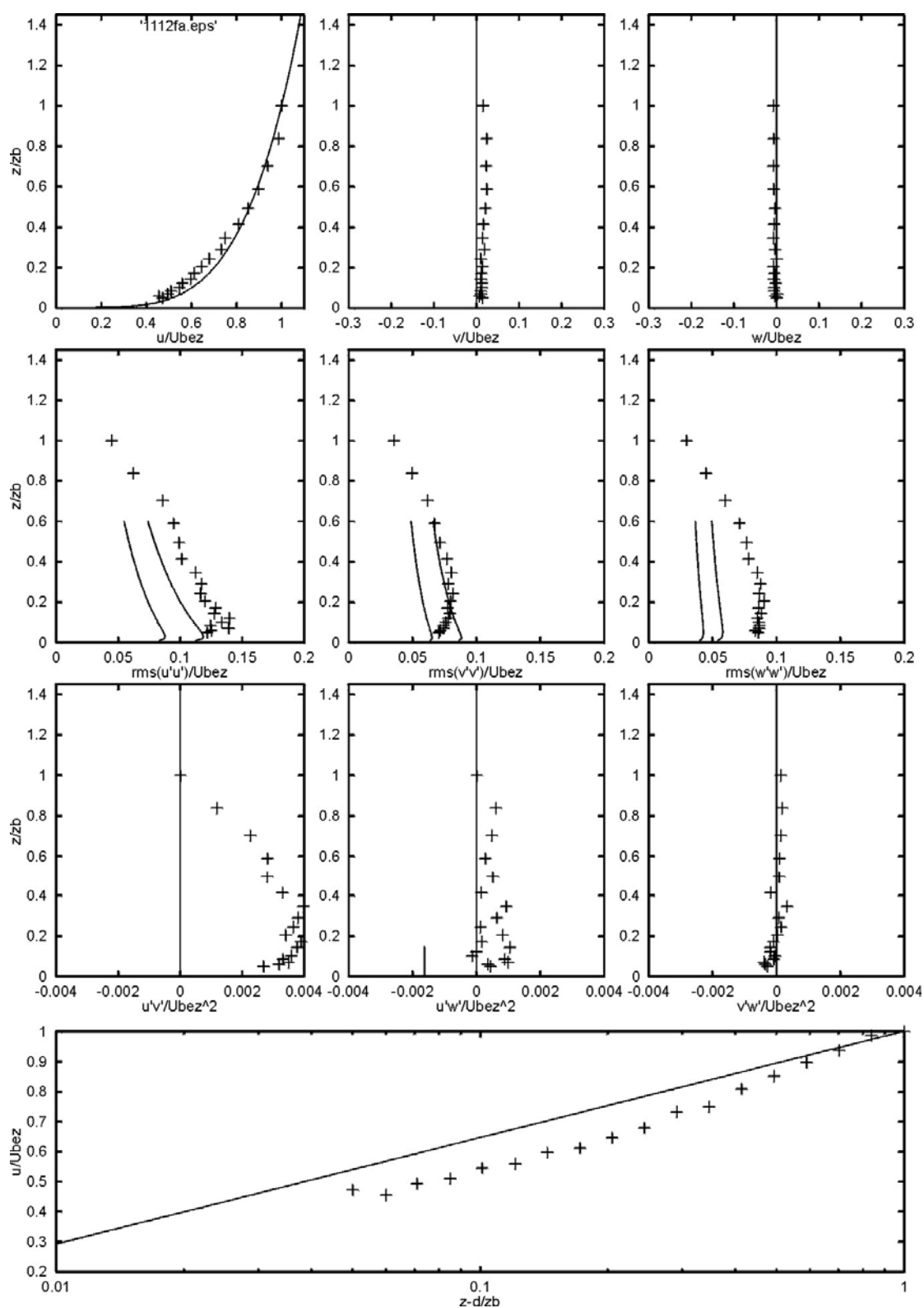
## Prilog C



Sl. C1: Barijera 1, podna hrapavost R1, brzina 8 m/s (regulacija brzine korištenjem hidrometrijskog krila), stativ, sonda zaokrenuta za  $90^\circ$ ,  $x = 0$  mm,  $y = 0$  mm

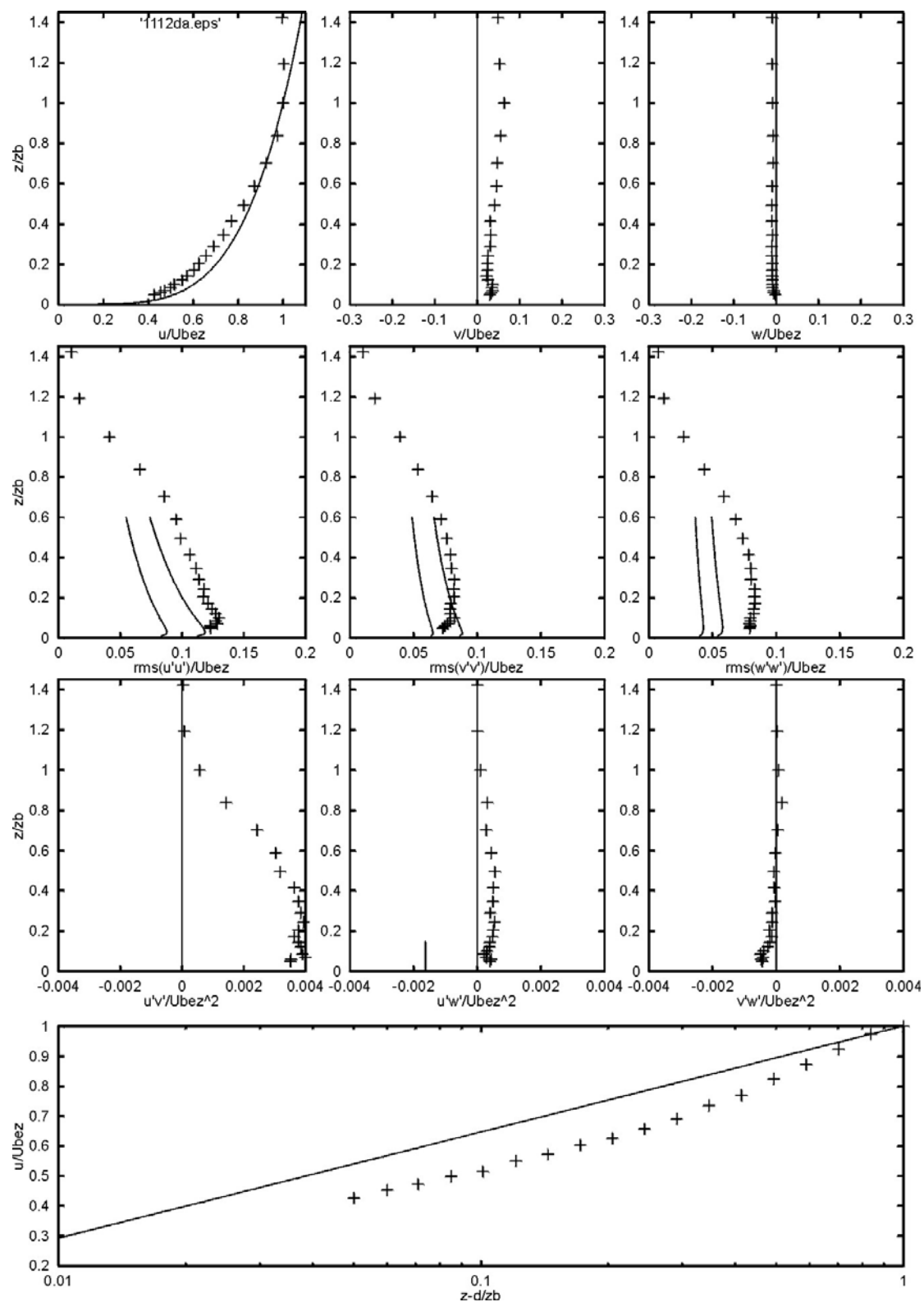


Sl. C2: Barijera 1, podna hrapavost R1, brzina 8 m/s (regulacija brzine korištenjem hidrometrijskog krila), suport, sonda zaokrenuta za  $90^\circ$ ,  $x = 0$  mm,  $y = 0$  mm

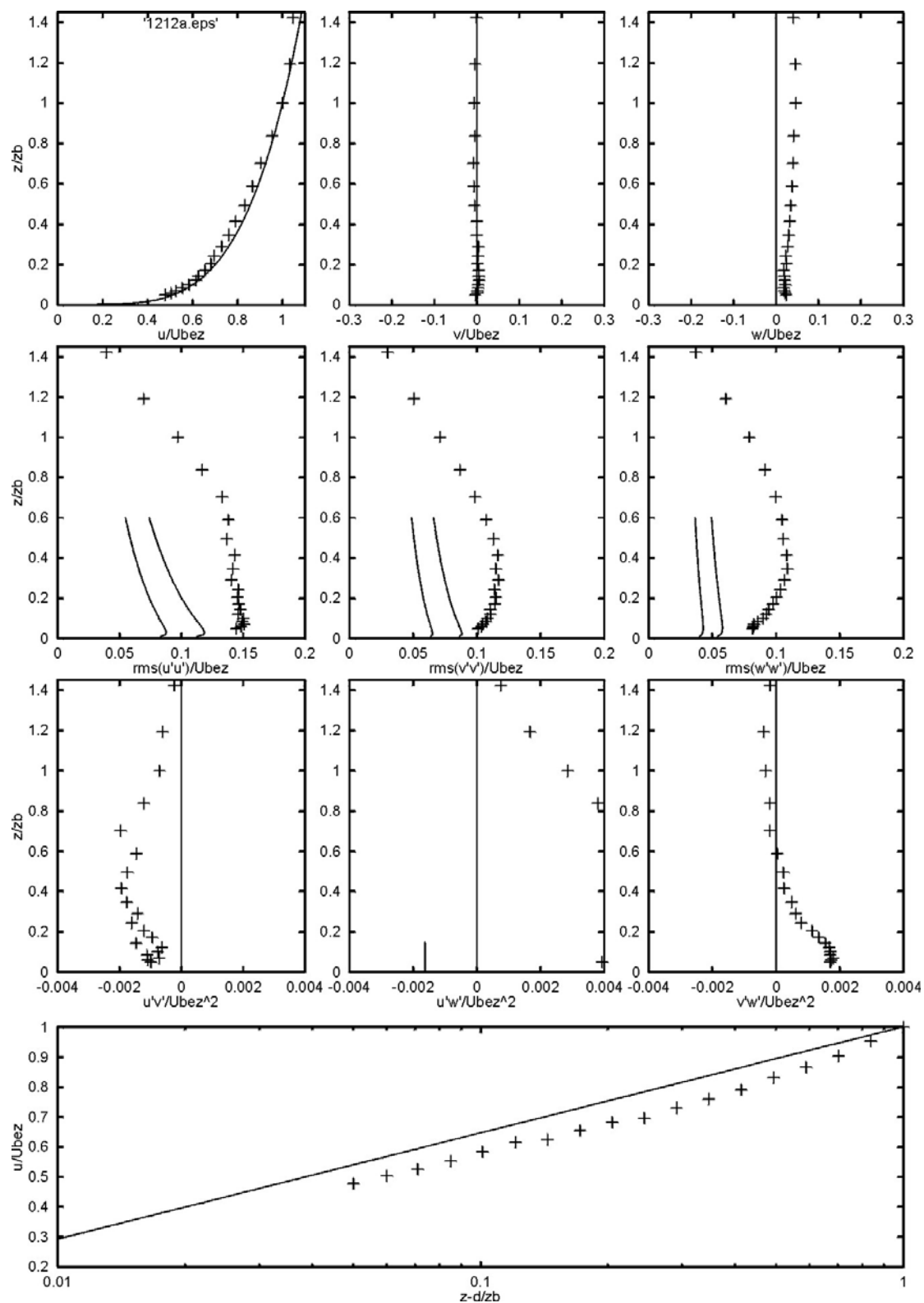


Sl. C3: Barijera 1, podna hrapavost R1, brzina 12 m/s (regulacija brzine korištenjem hidrometrijskog krila), suport, sonda zaokrenuta za  $90^\circ$ ,  $x = 0$  mm,  $y = 0$  mm

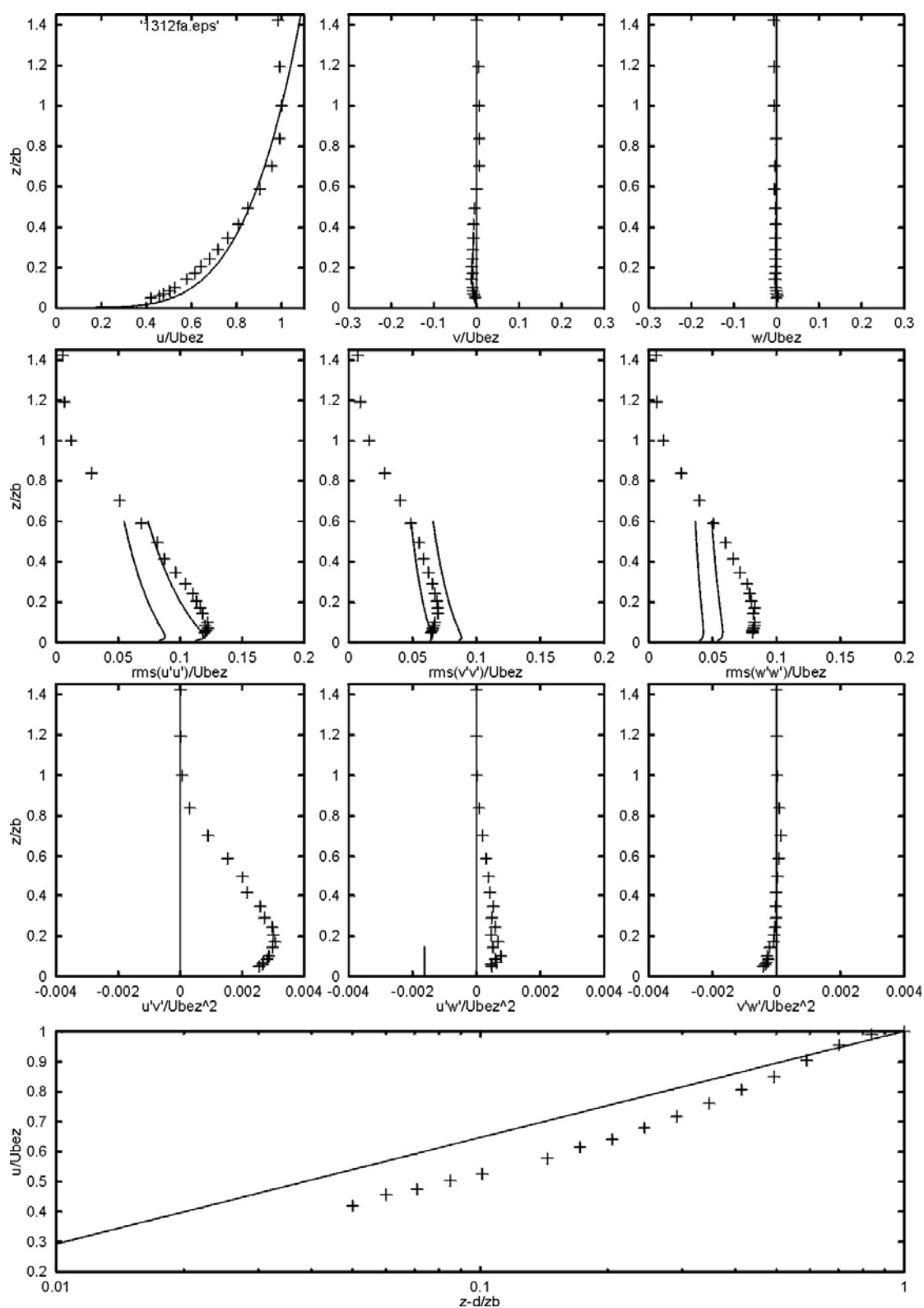




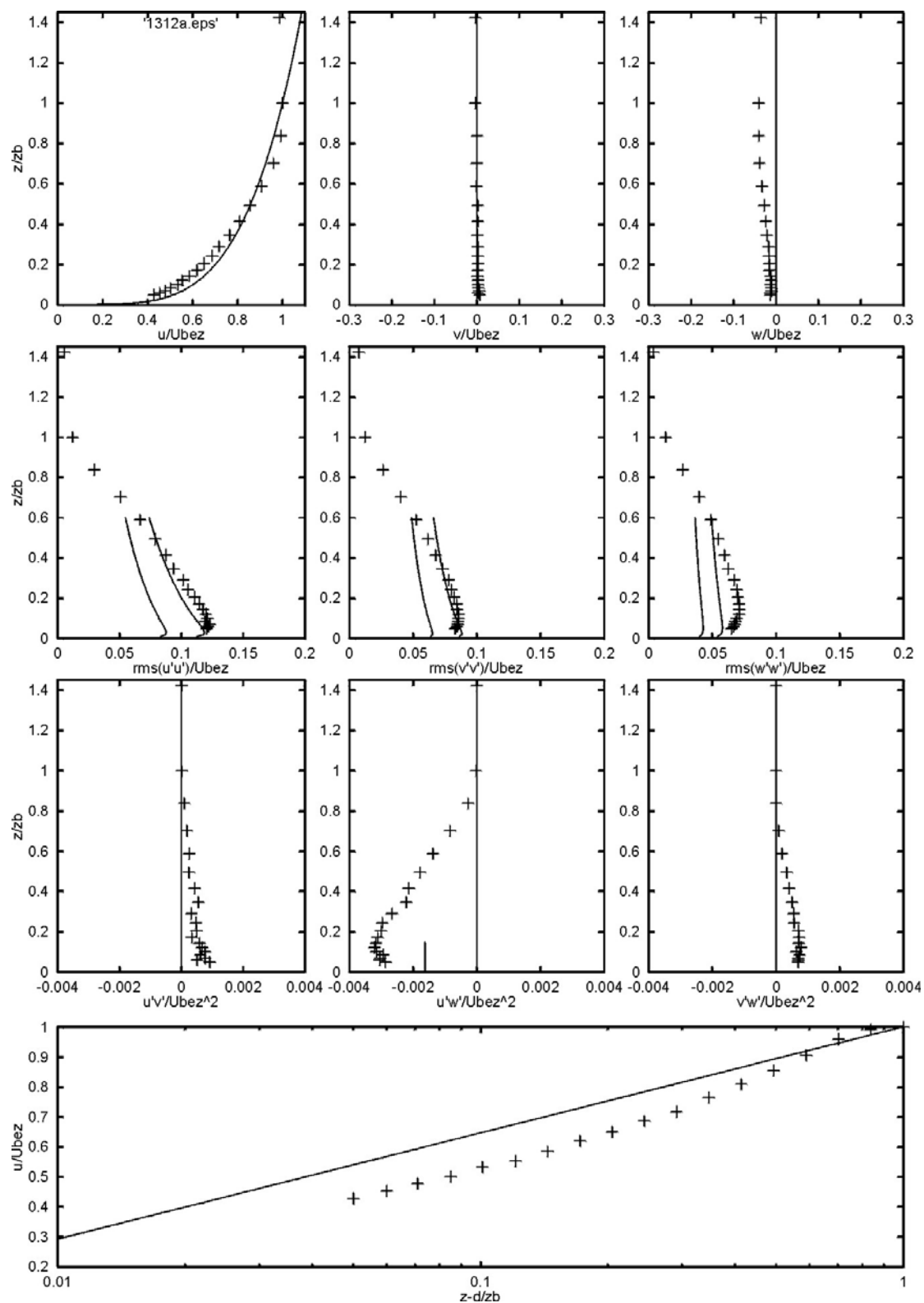
Sl. C4: Barijera 1, podna hrapavost R1, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 360 \text{ min}^{-1}$ ), suport, sonda zaokrenuta za  $90^\circ$ ,  $x = 0$  mm,  $y = 0$  mm



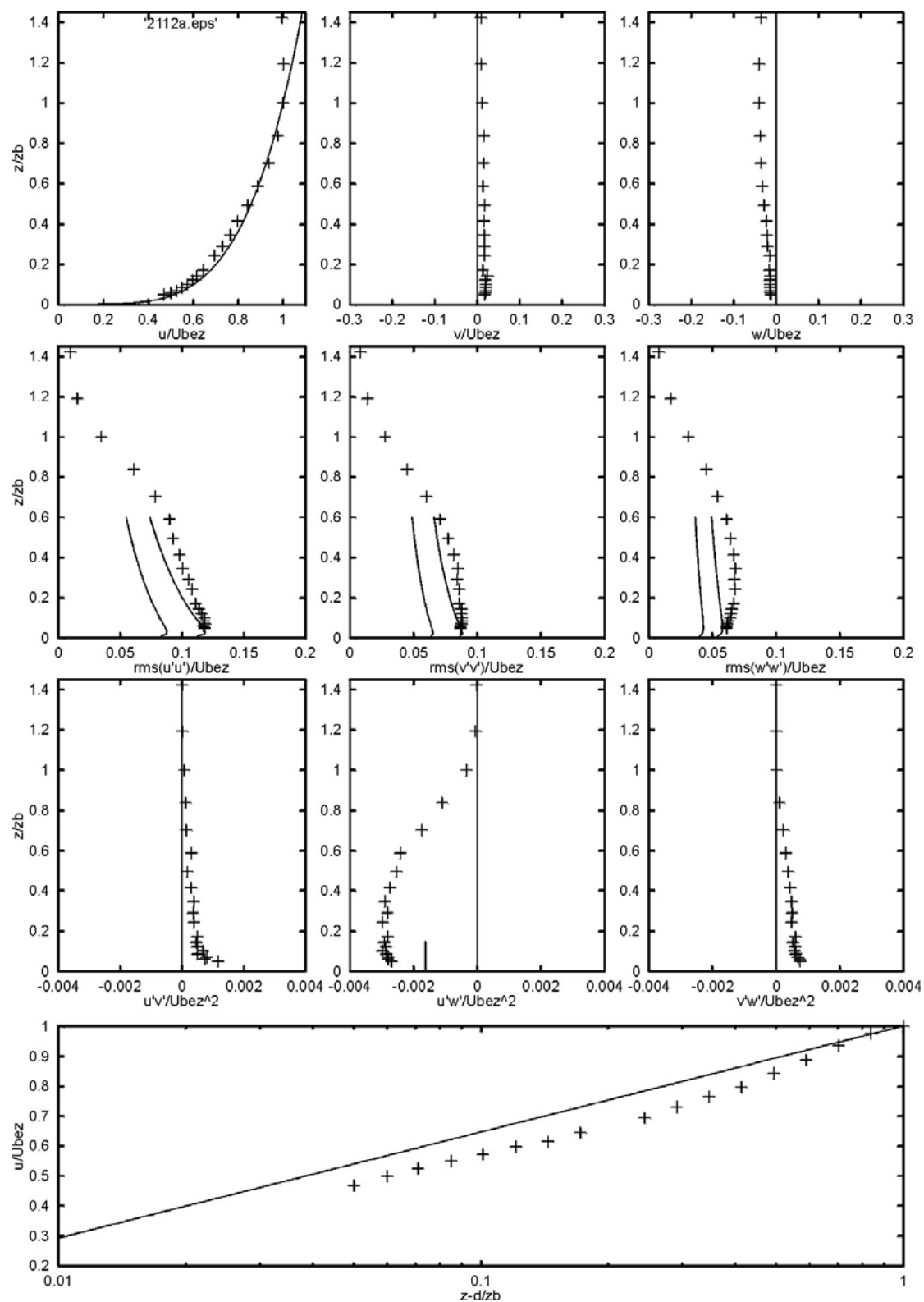
Sl. C5: Barijera 2, podna hrapavost R1, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, sonda zaokrenuta za  $90^\circ$ ,  $x = 0$  mm,  $y = 0$  mm



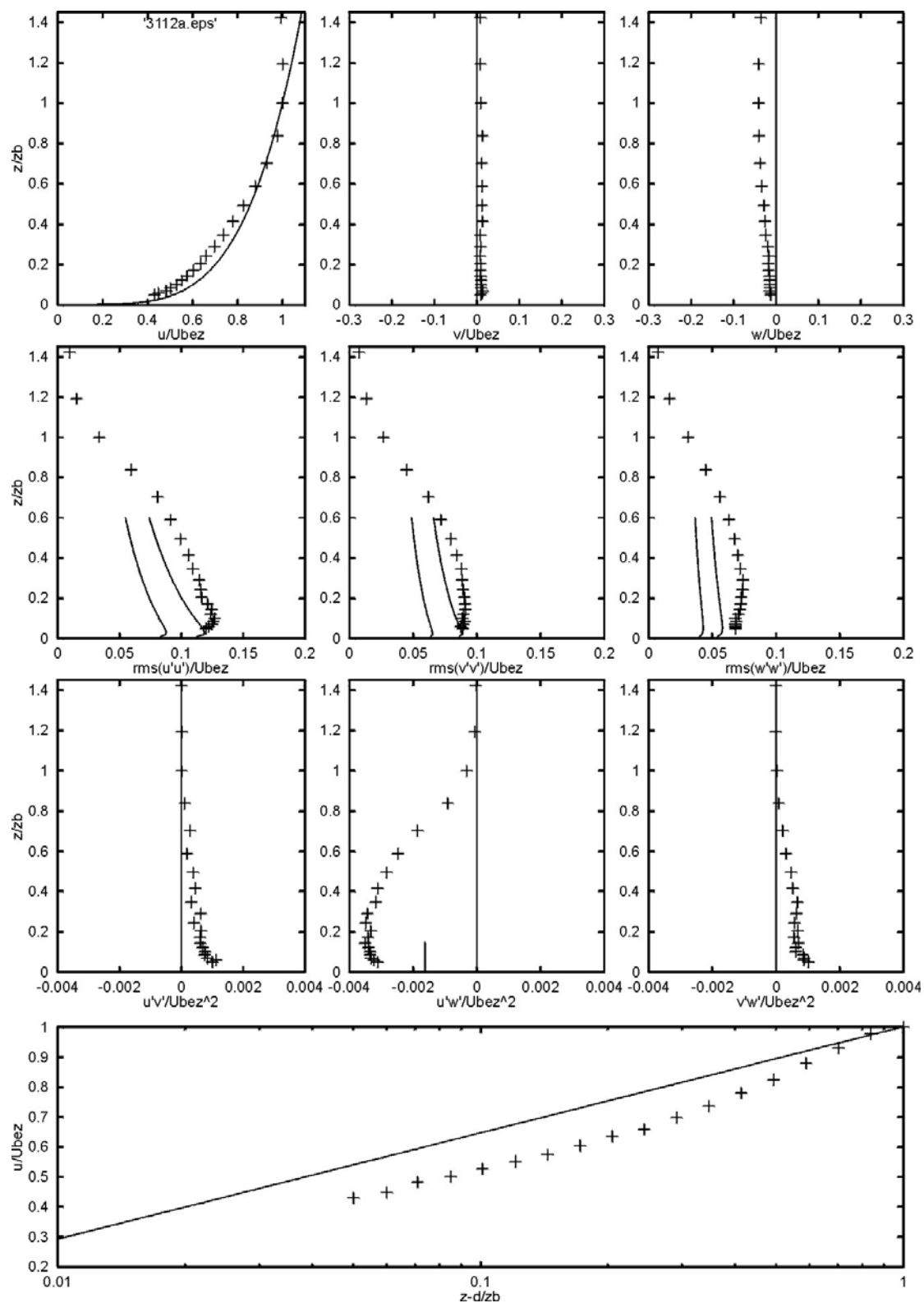
Sl. C6: Barijera 3, podna hrapavost R1, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport, sonda zaokrenuta za  $90^\circ$ ,  $x = 0$  mm,  $y = 0$  mm



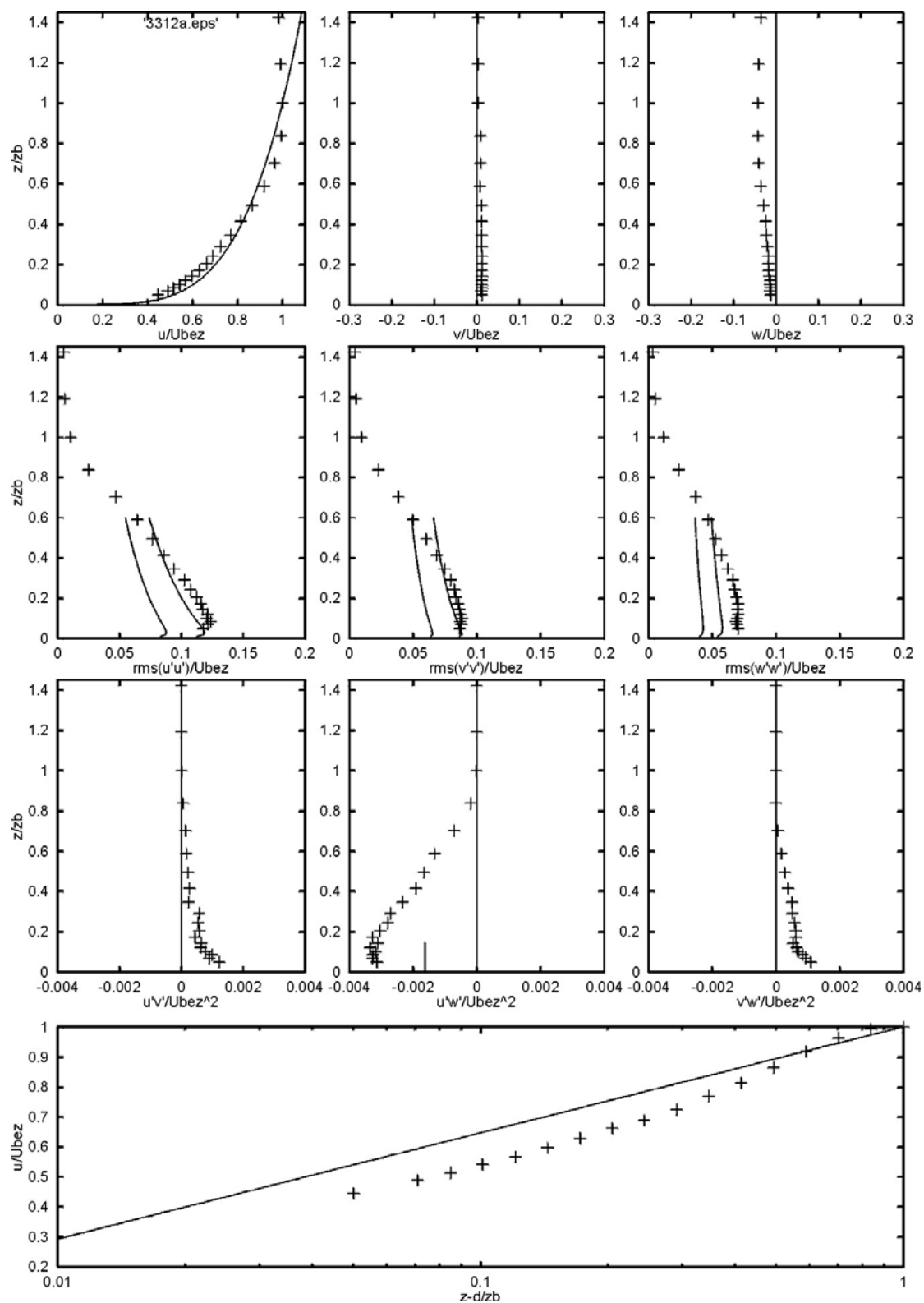
Sl. C7: Barijera 3, podna hrapavost R1, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$



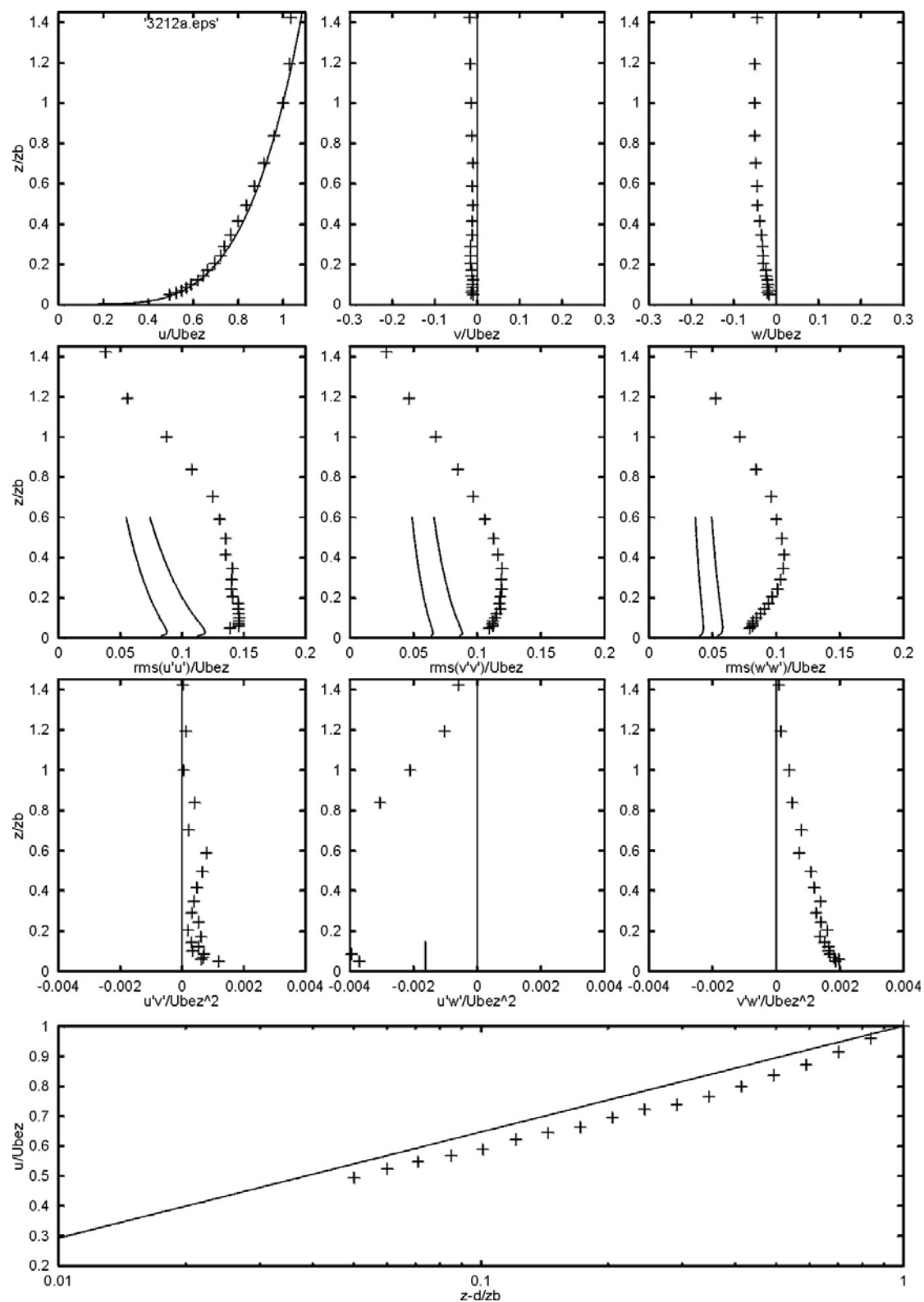
Sl. C8: Barijera 1, podna hrapavost R2, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$



Sl. C9: Barijera 1, podna hrapavost R3, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$

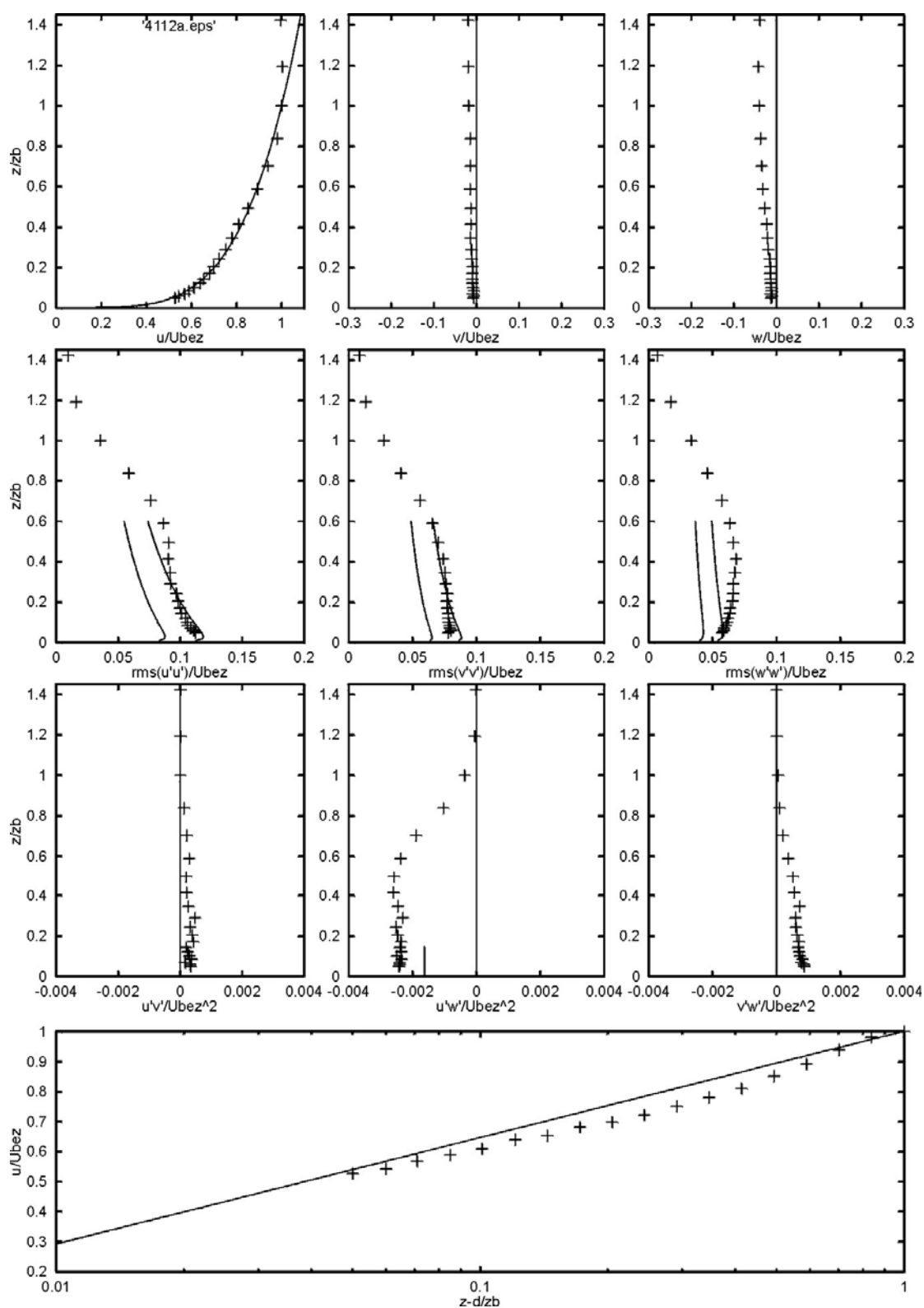


Sl. C10: Barijera 3, podna hrapavost R3, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$

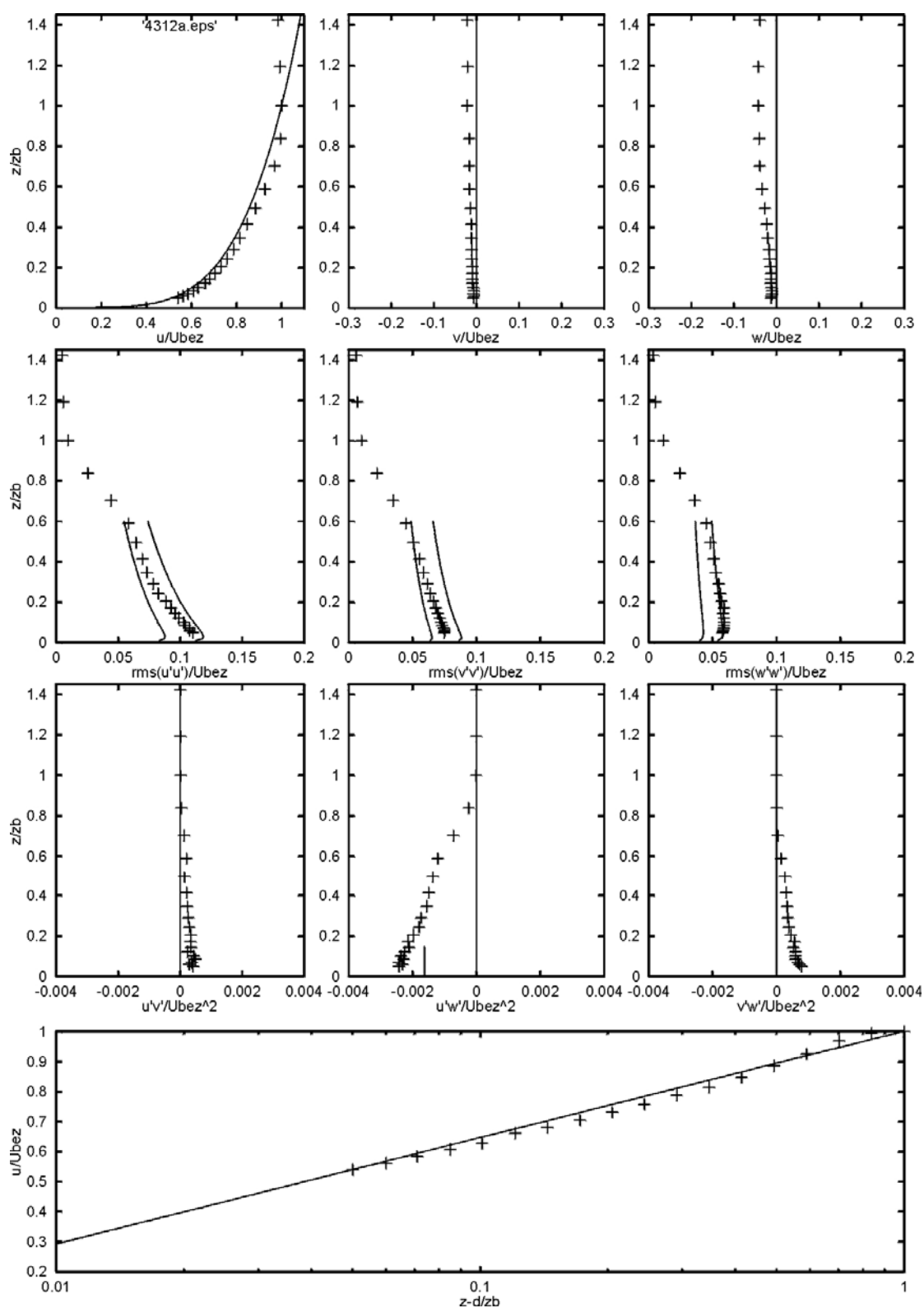


Sl. C11: Barijera 2, podna hrapavost R3, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$

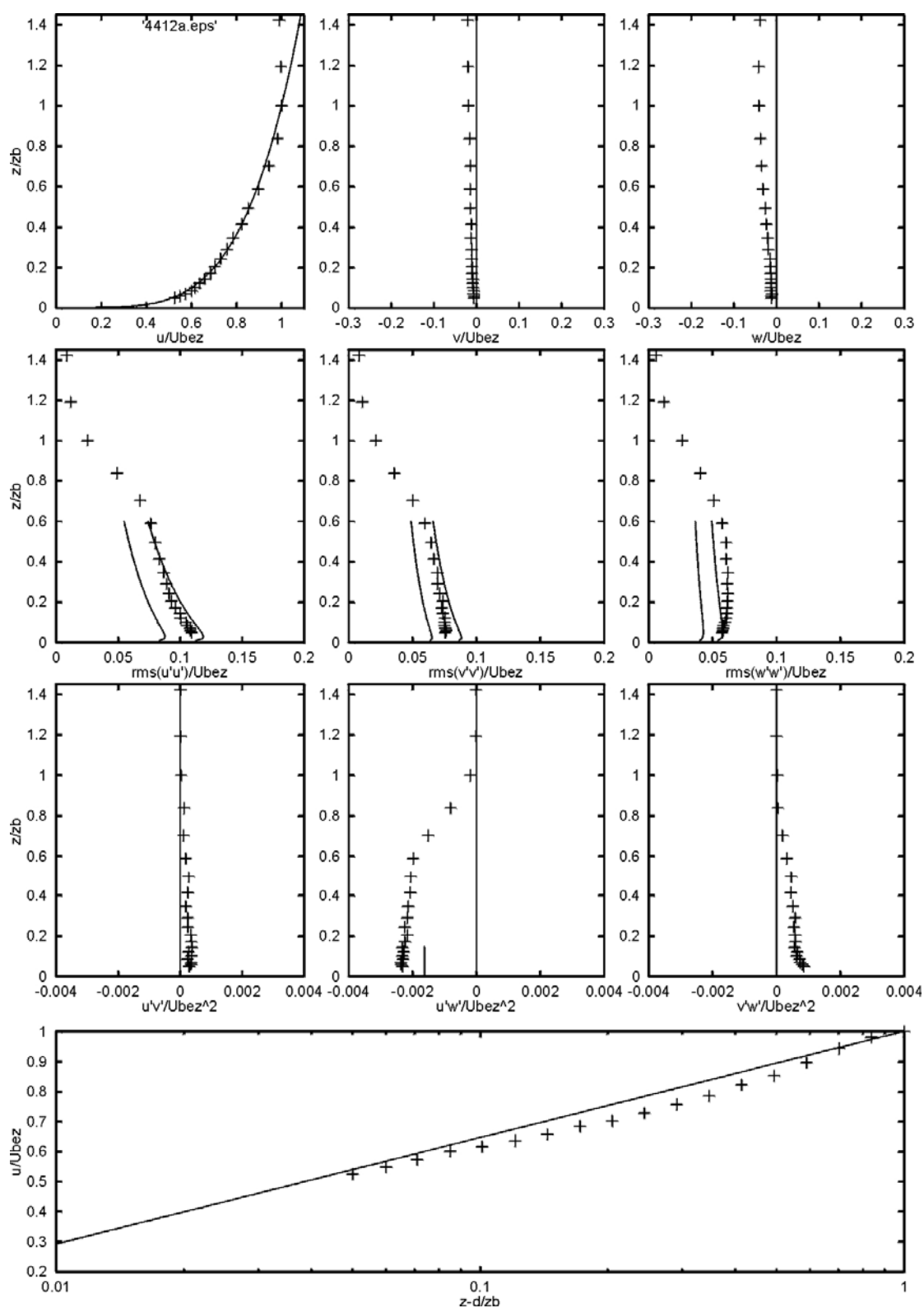




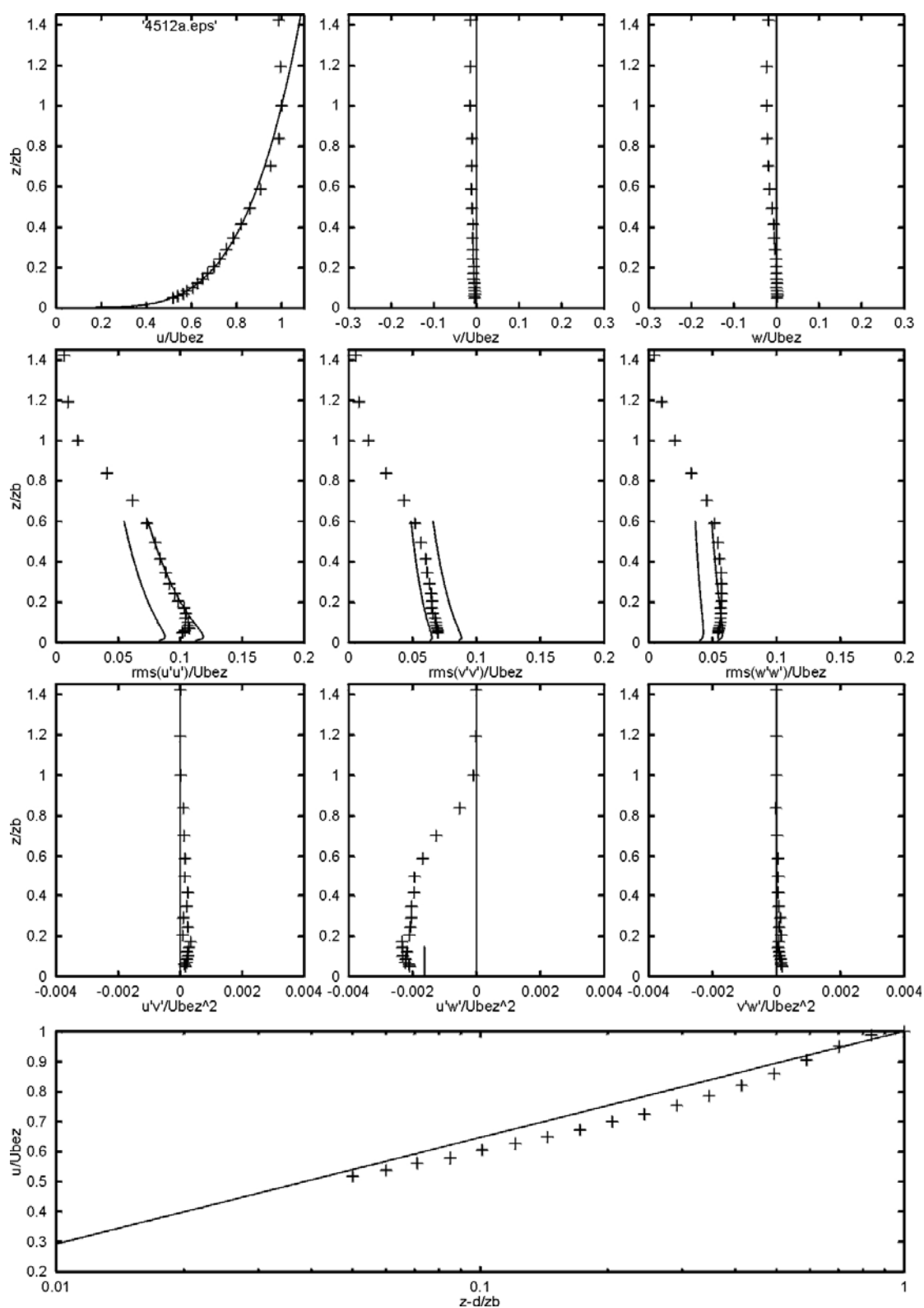
Sl. C12: Barijera 1, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$



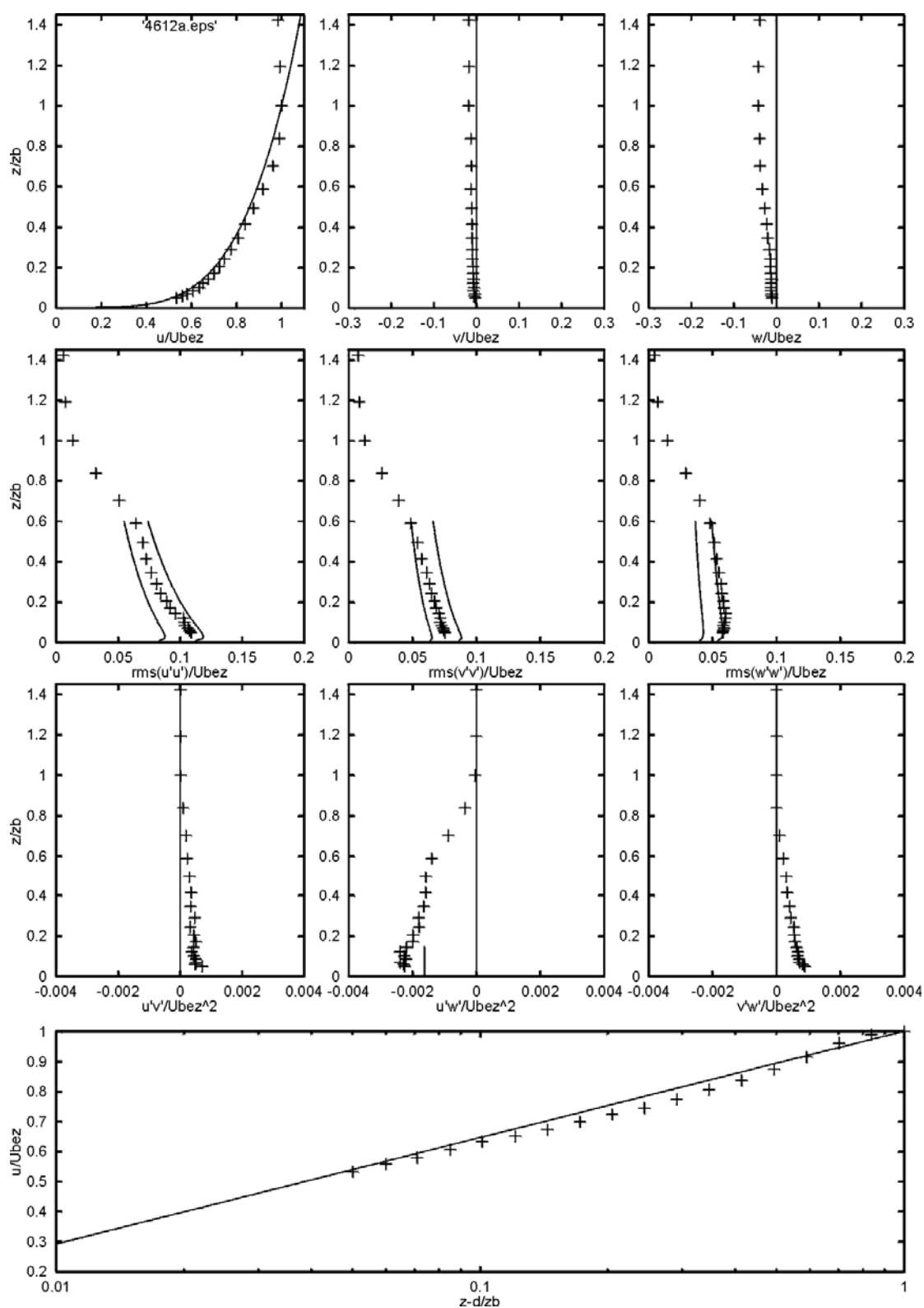
Sl. C13: Barijera 3, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$



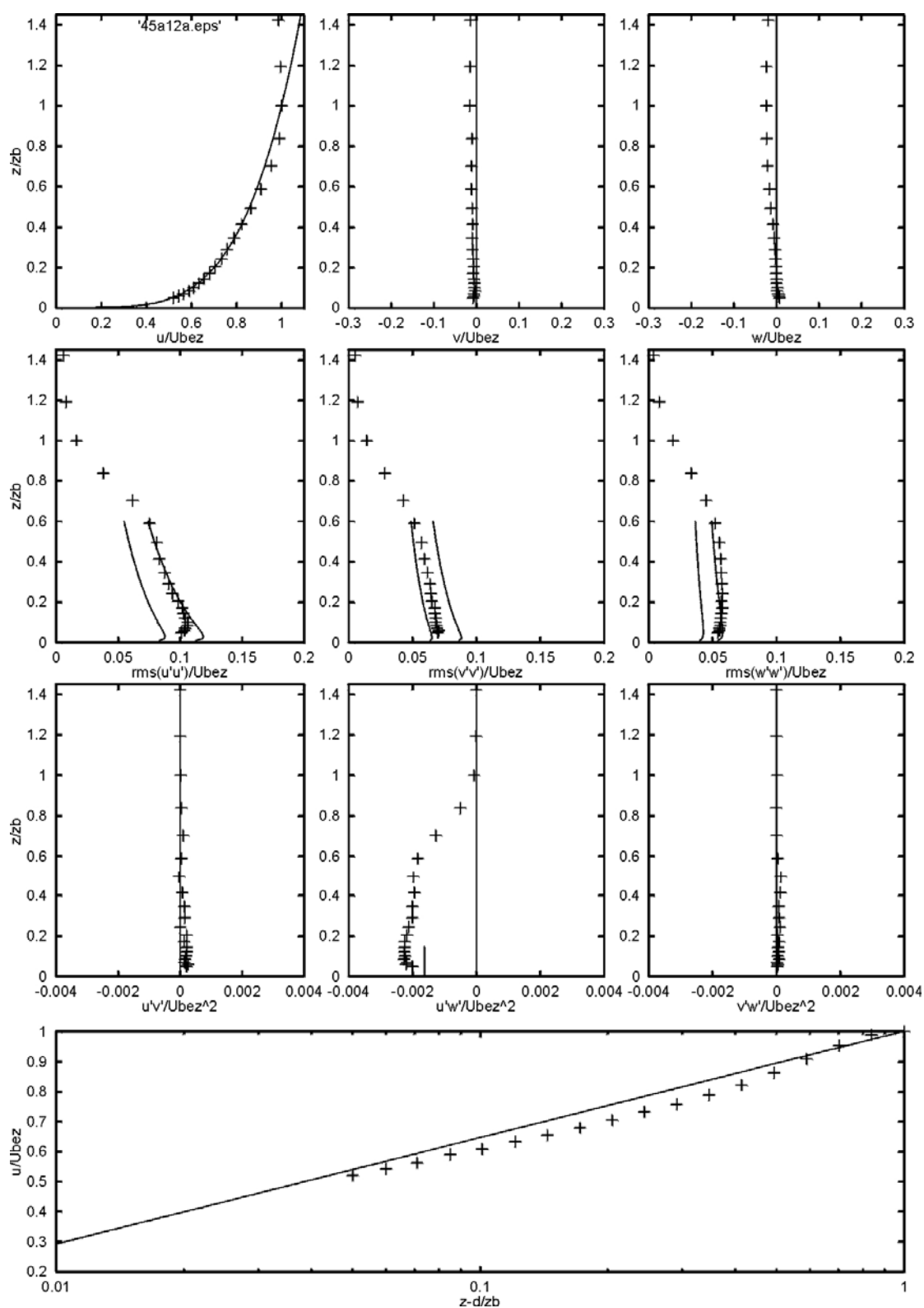
Sl. C14: Barijera 4, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$



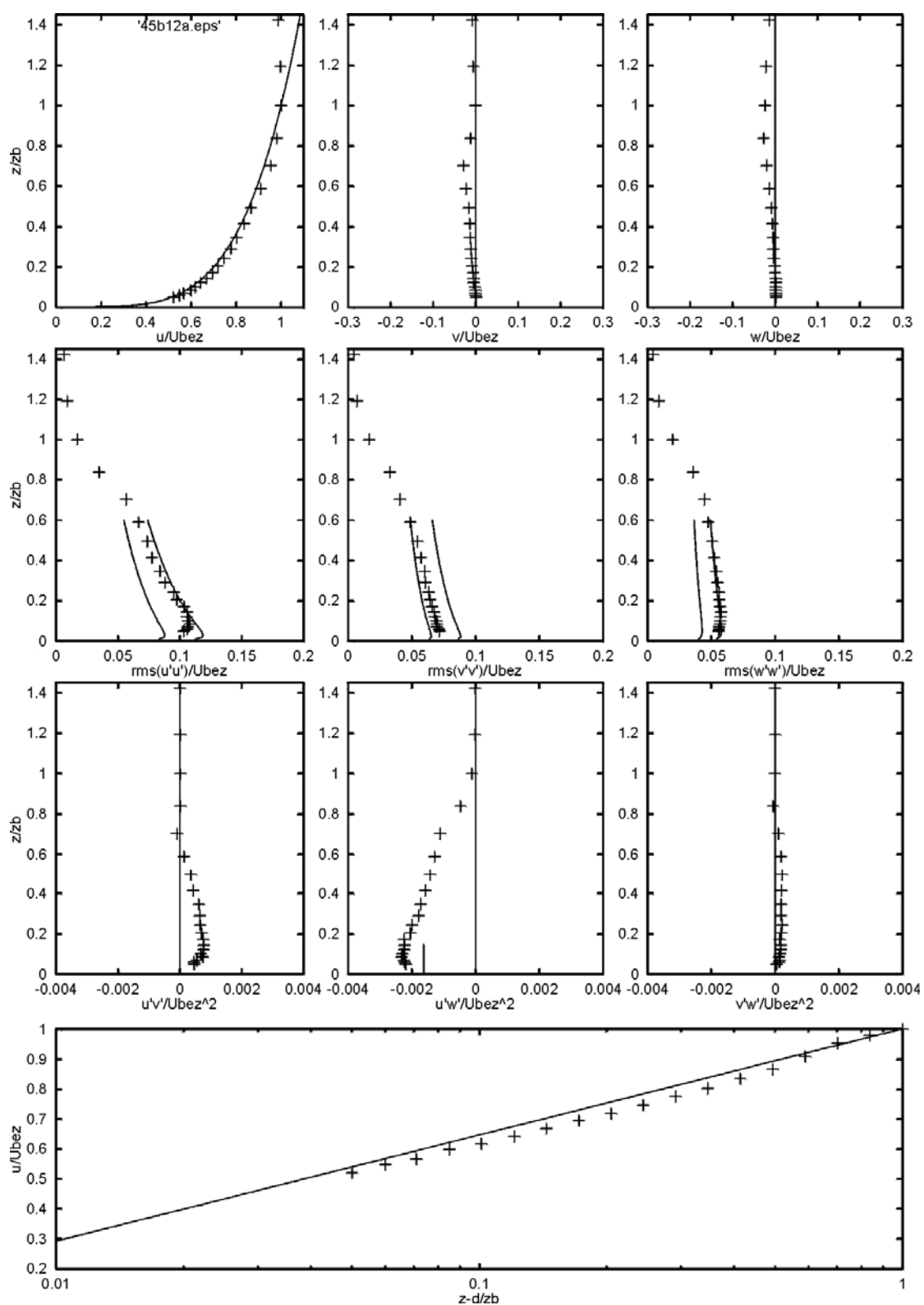
Sl. C15: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$



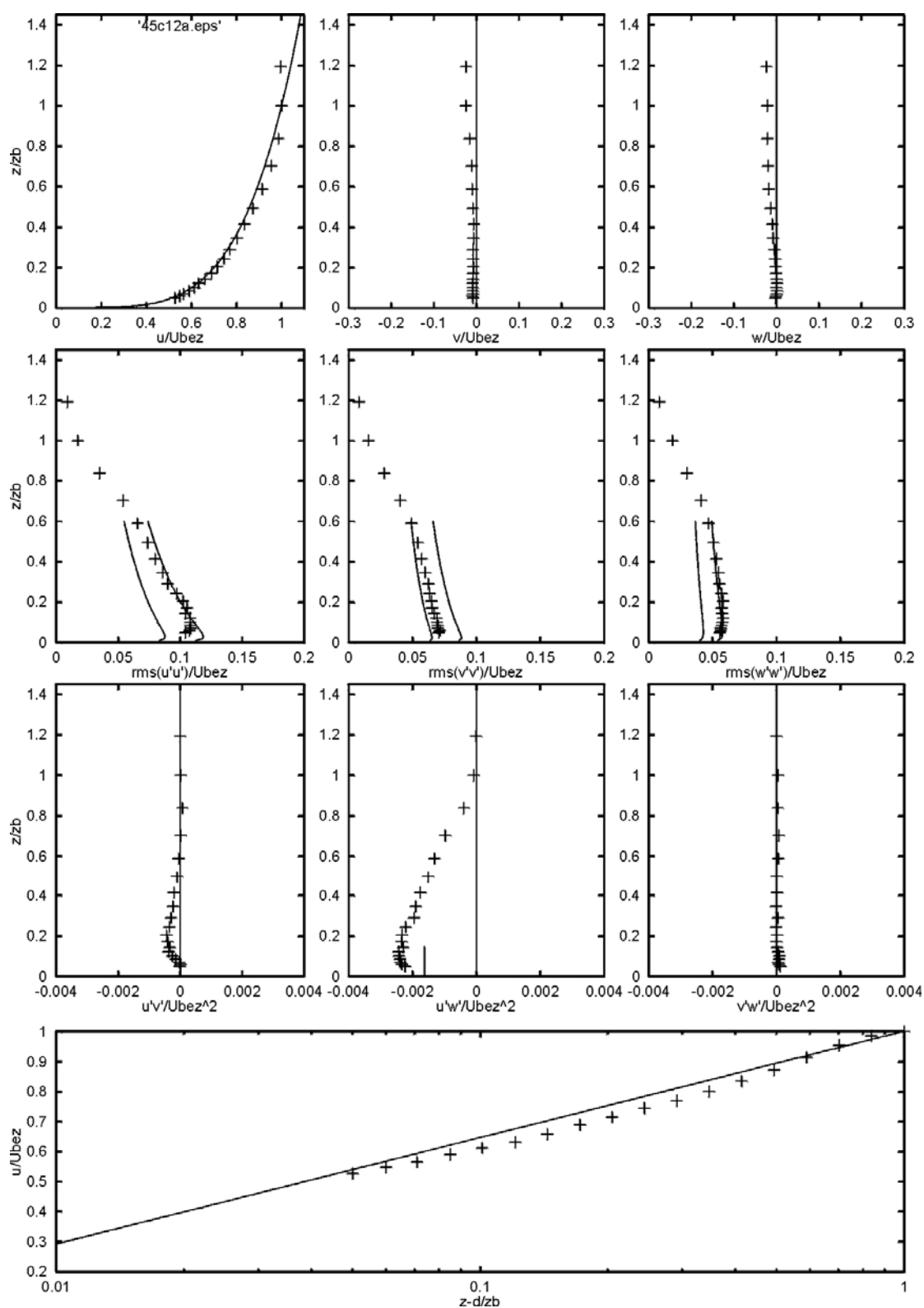
Sl. C16: Barijera 6, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$



Sl. C17: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = -1000$  mm,  $y = 0$  mm

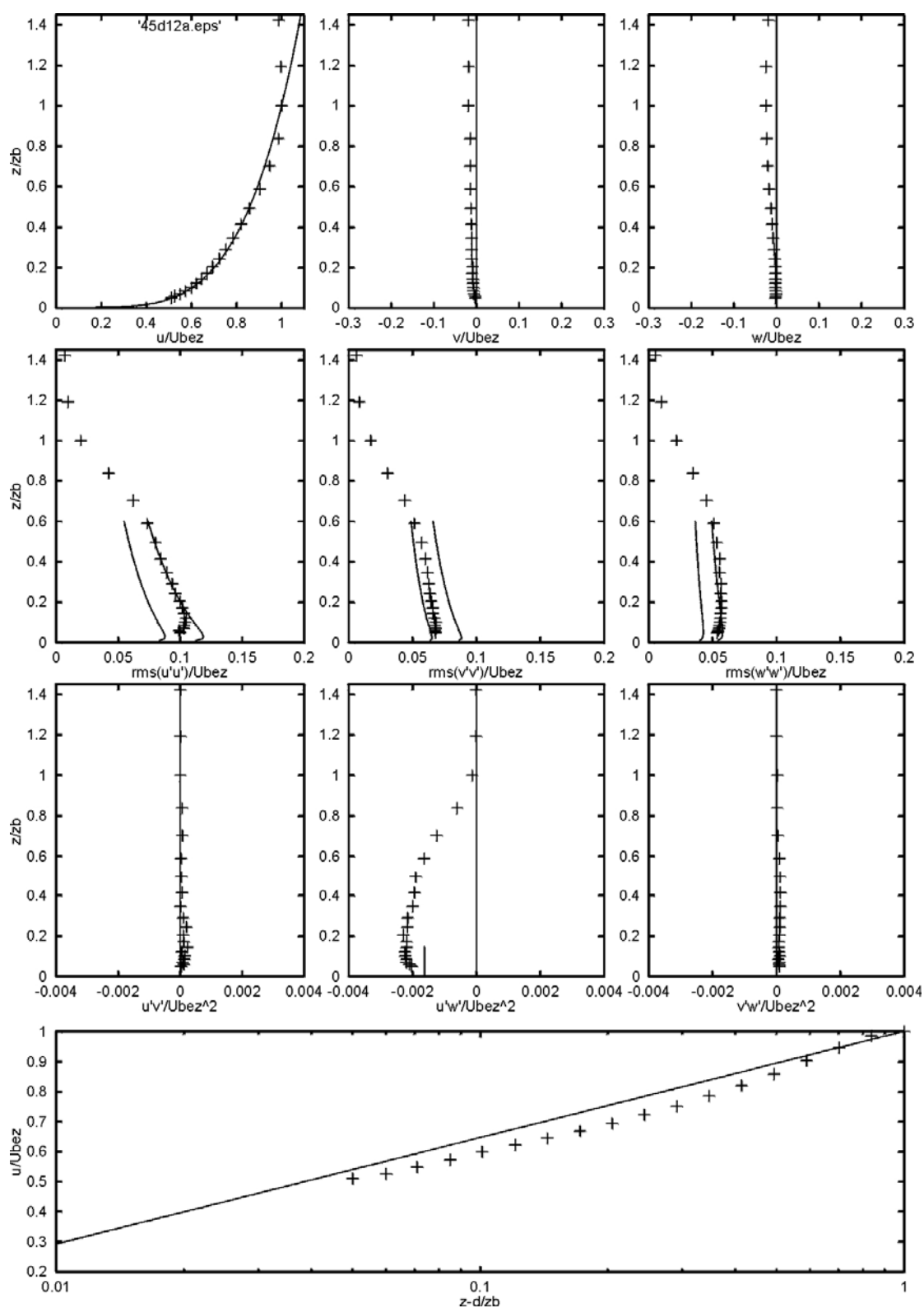


Sl. C18: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0$  mm,  $y = 500$  mm

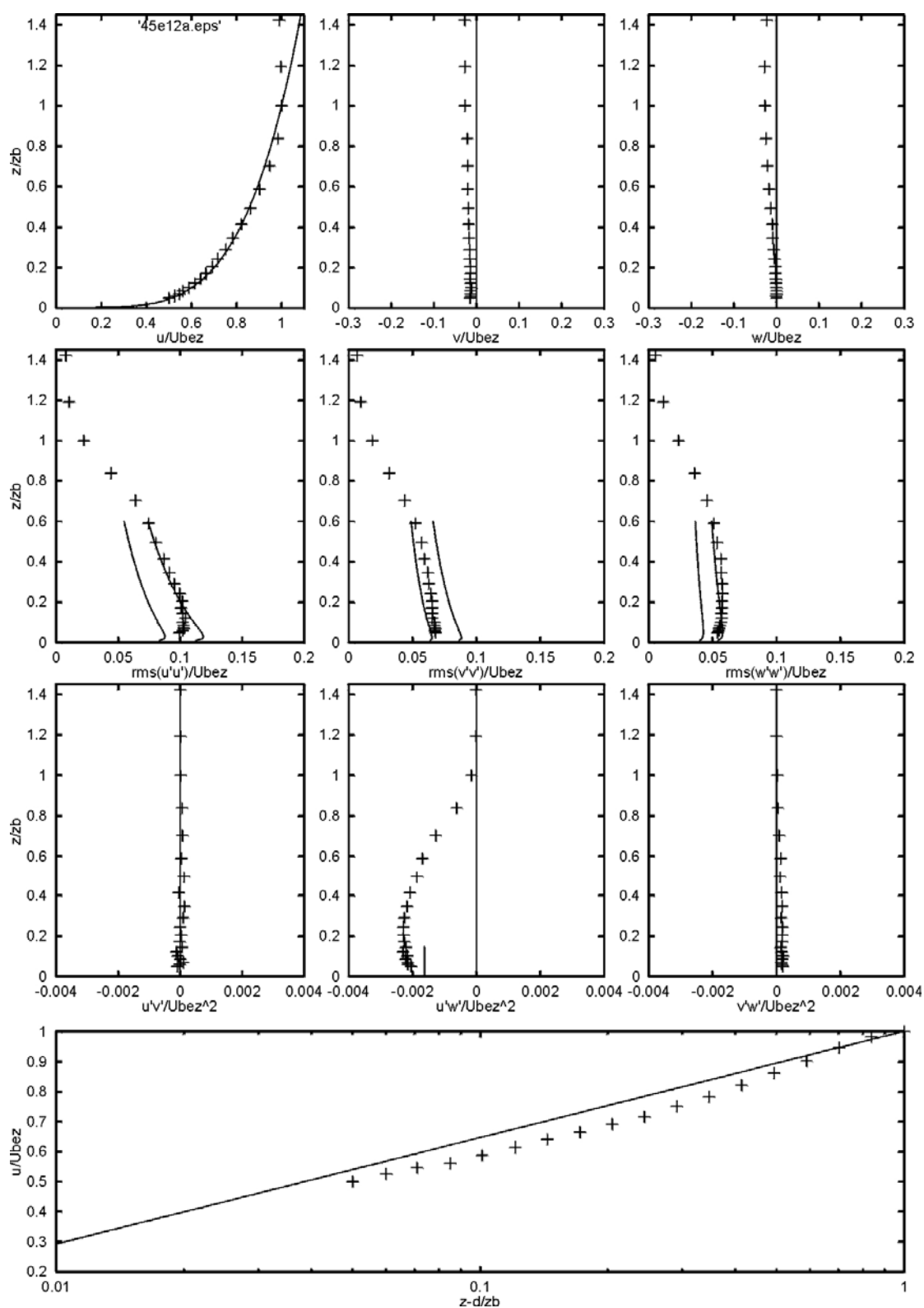


Sl. C19: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0$  mm,  $y = -500$  mm

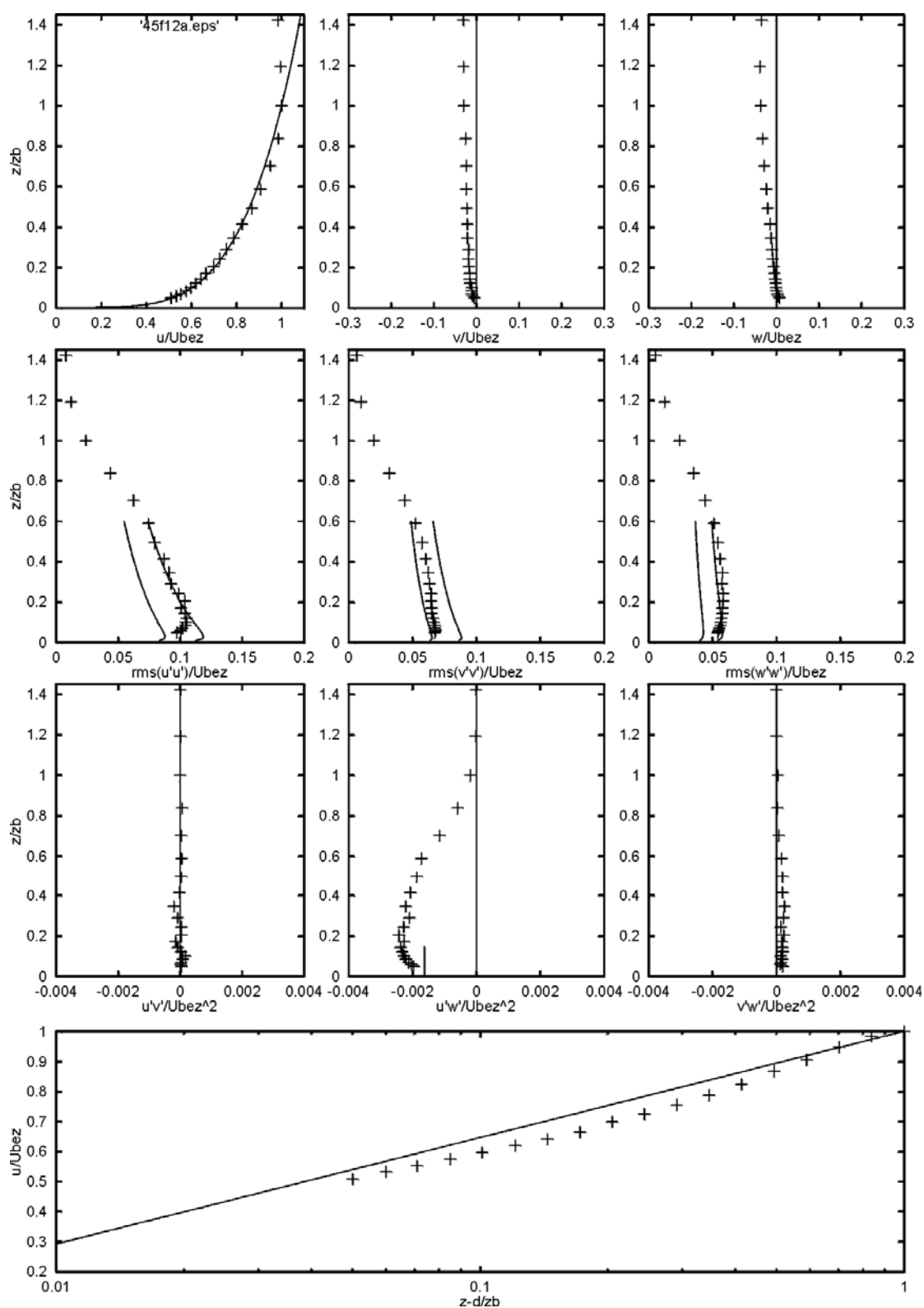




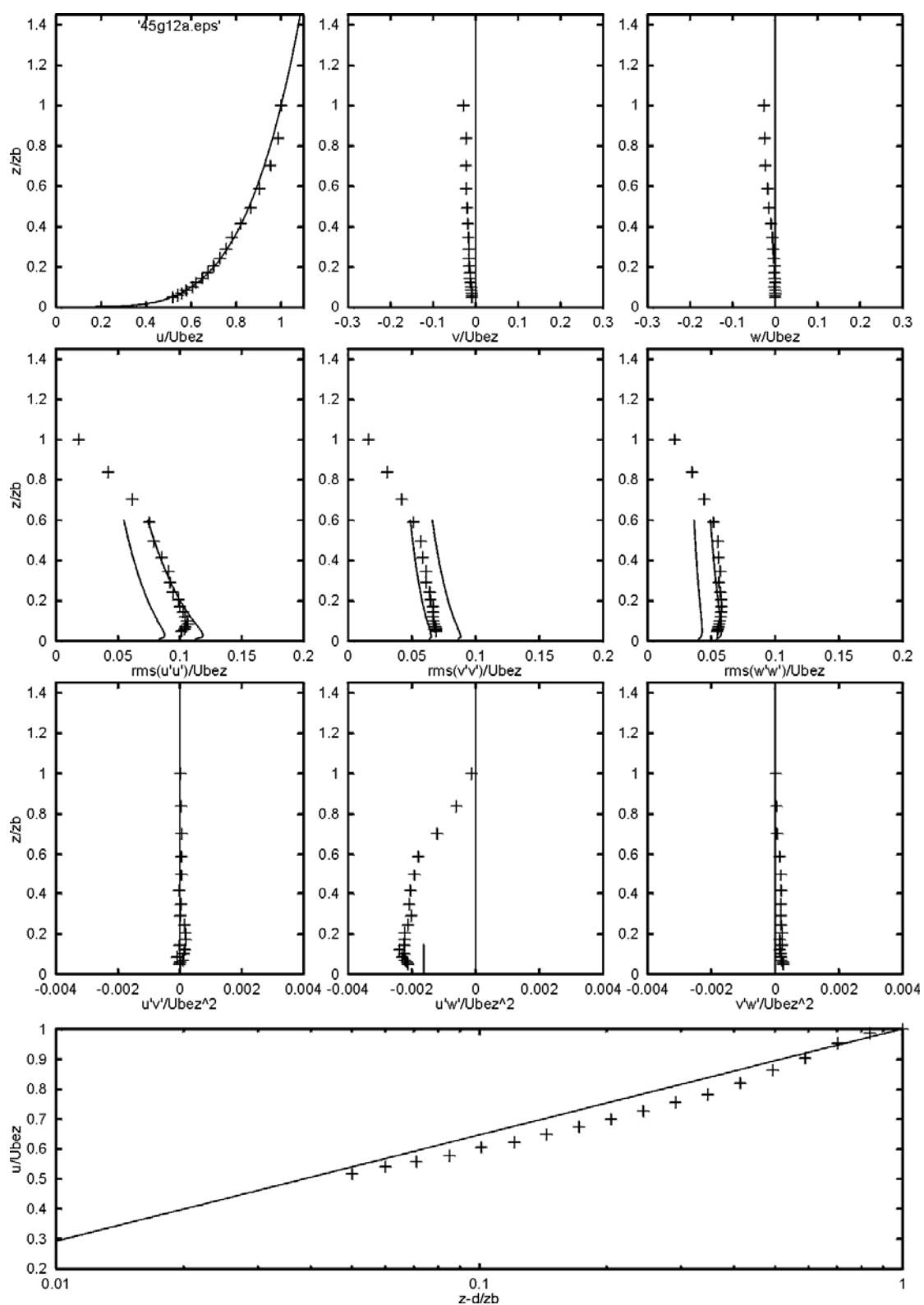
Sl. C20: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 1000 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$



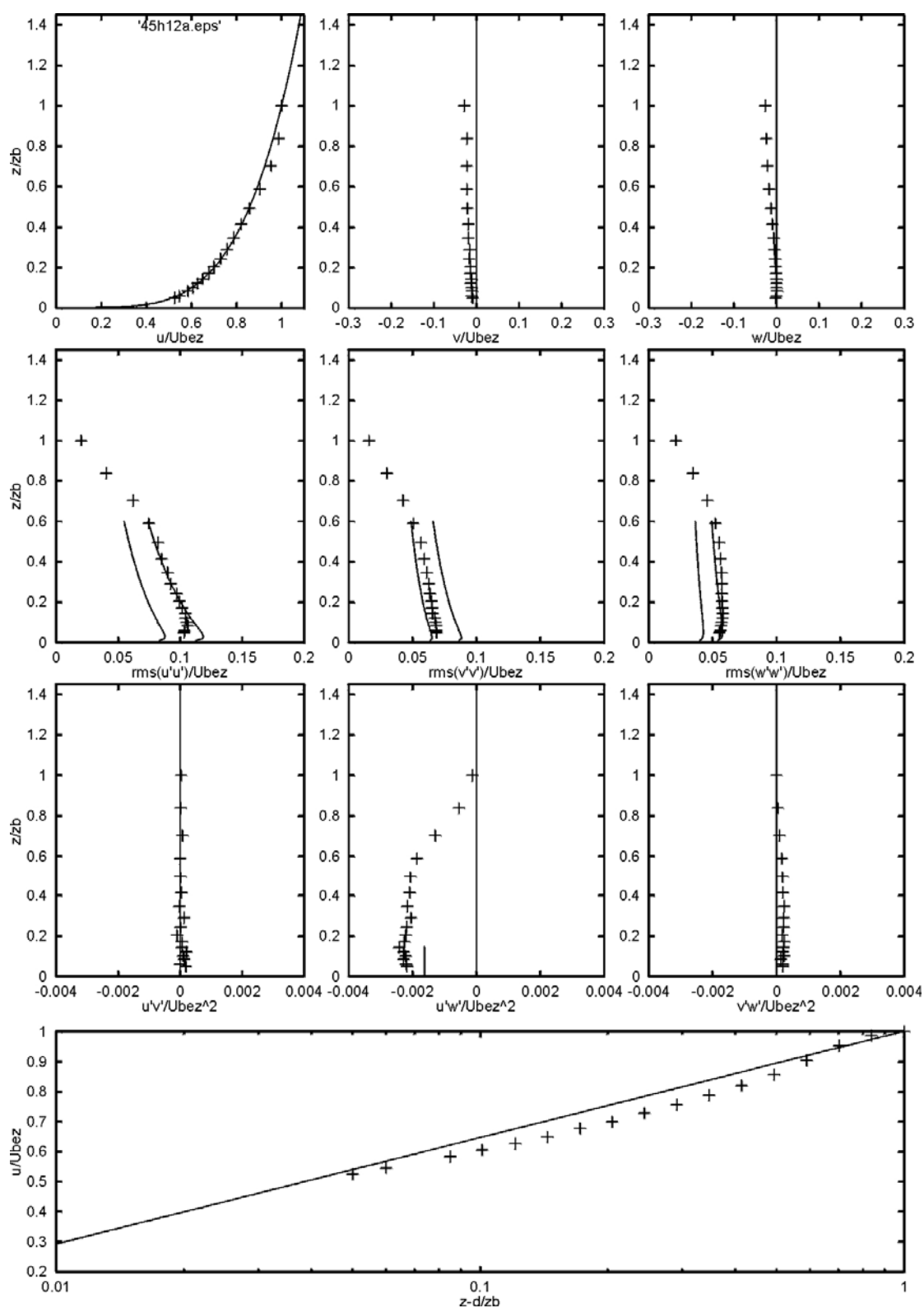
Sl. C21: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 2000 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$



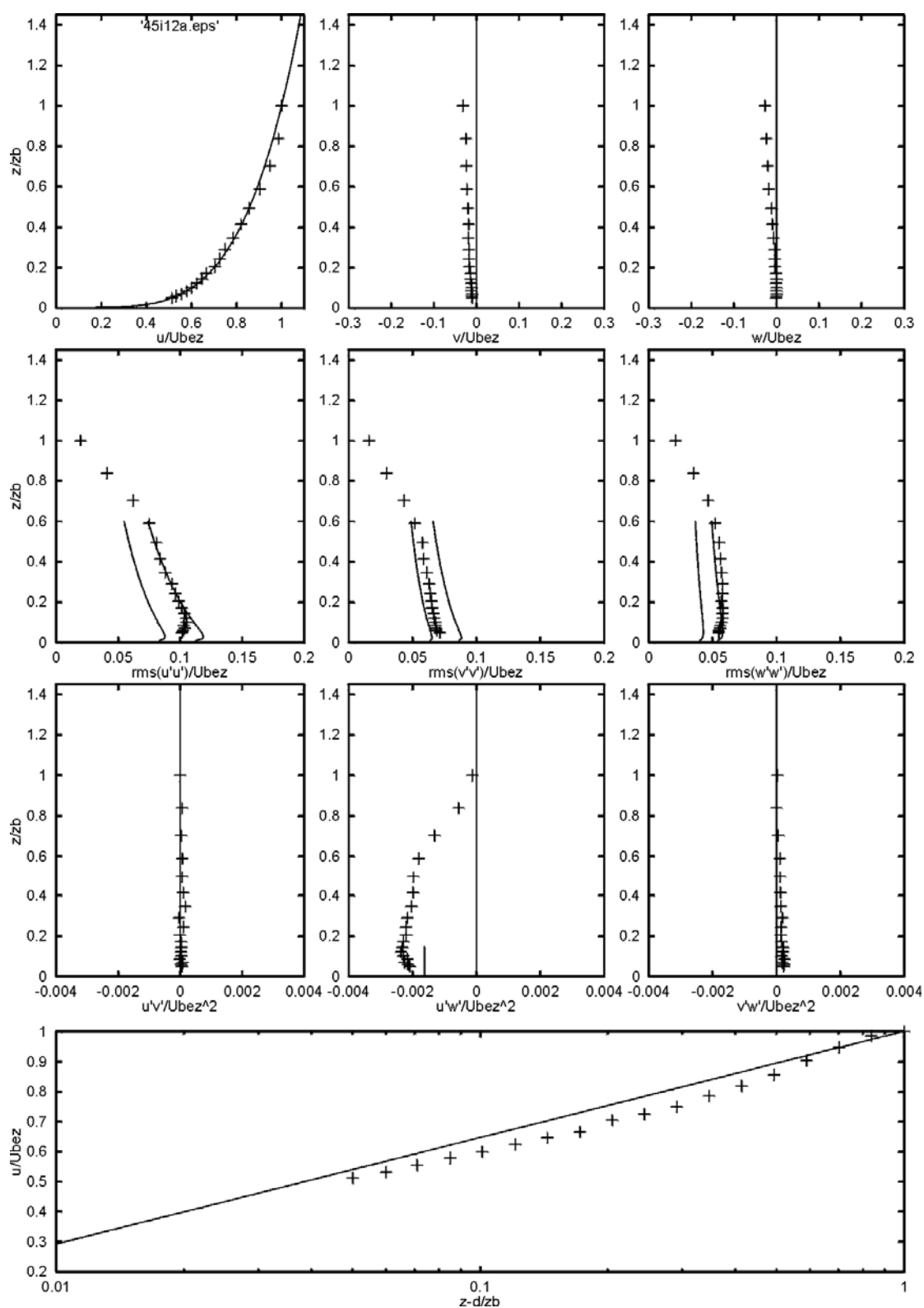
Sl. C22: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 3000 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$



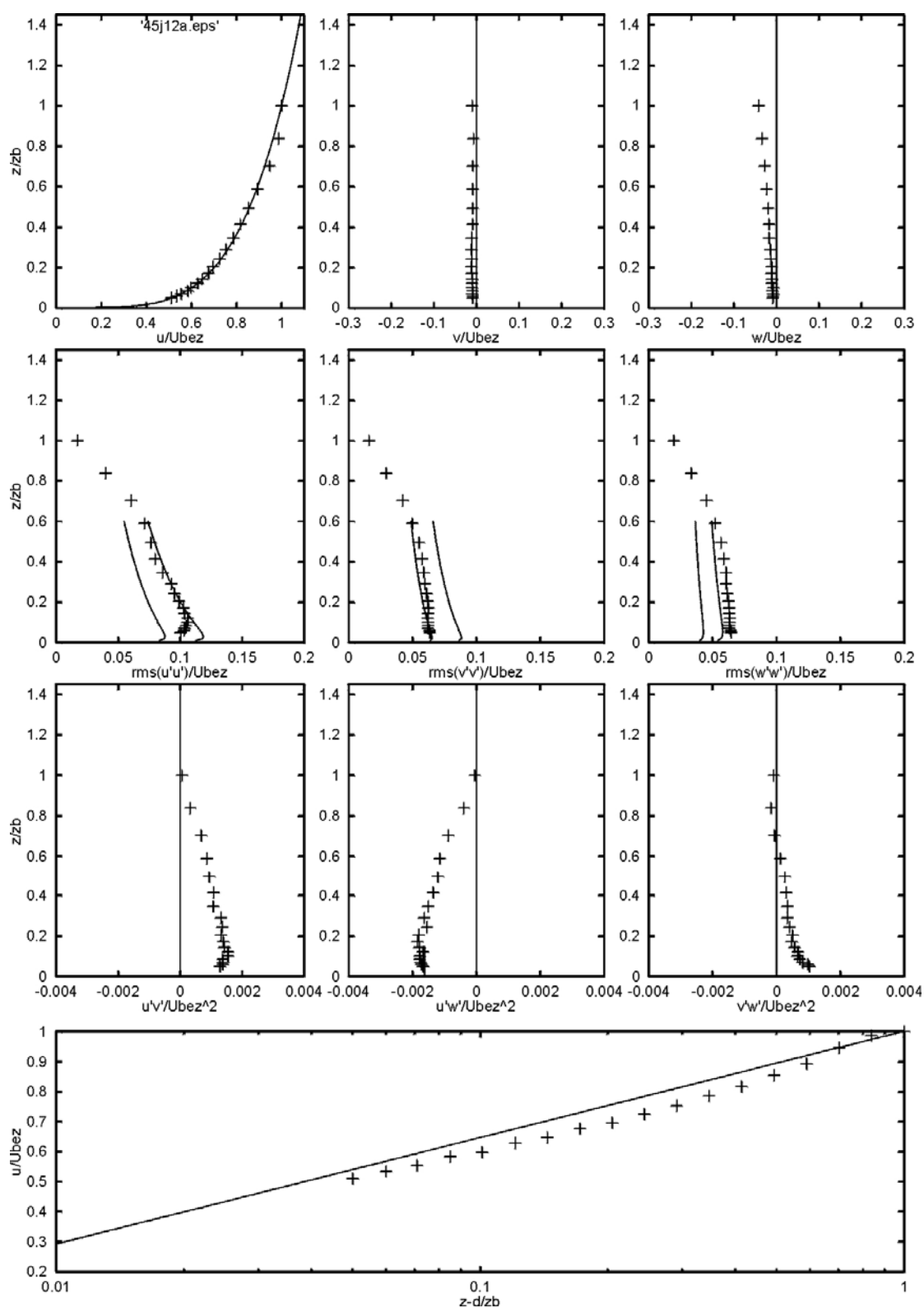
Sl. C23: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0$  mm,  $y = 10$  mm



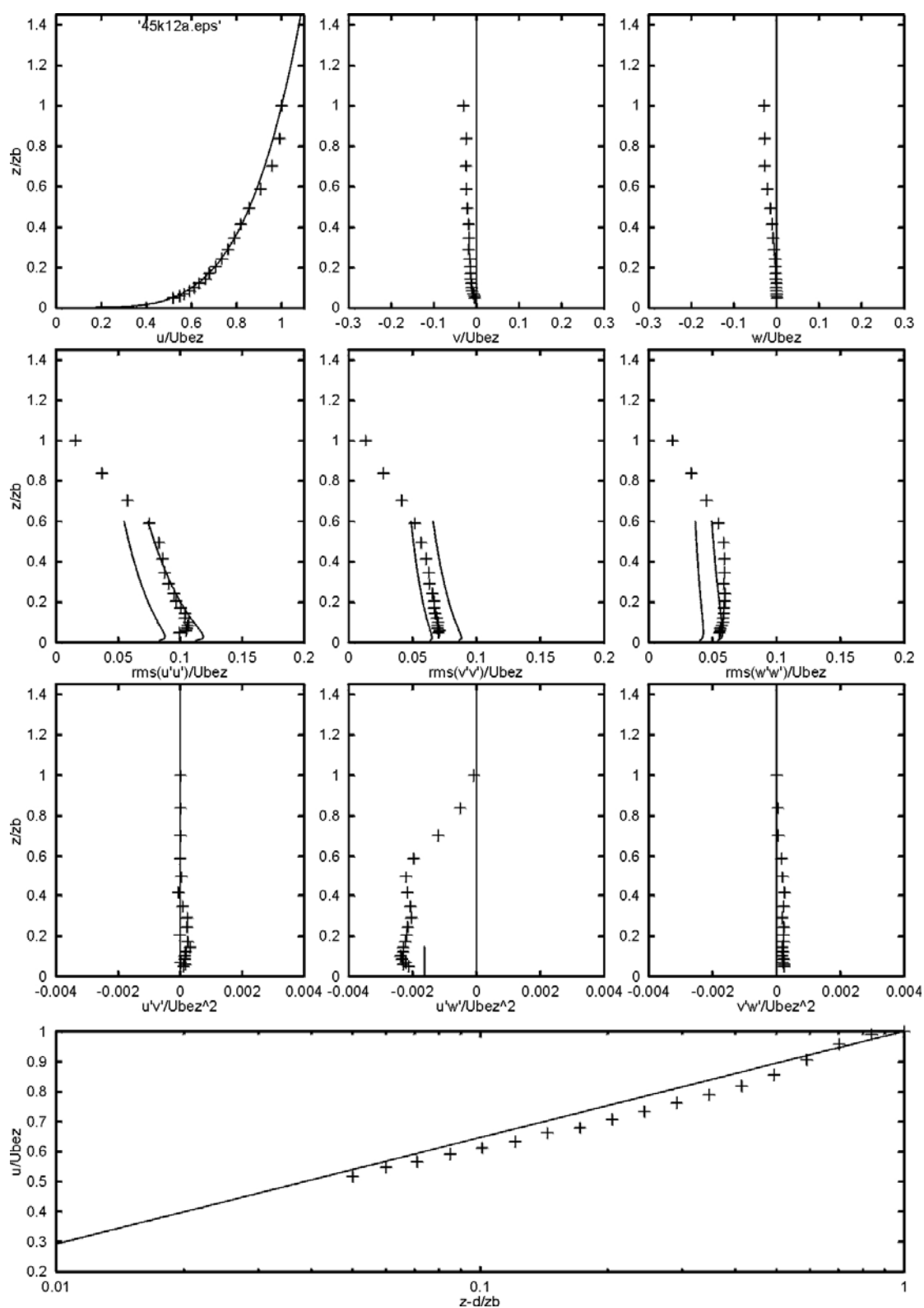
Sl. C24: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 55 \text{ mm}$



Sl. C25: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0$  mm,  $y = -40$  mm

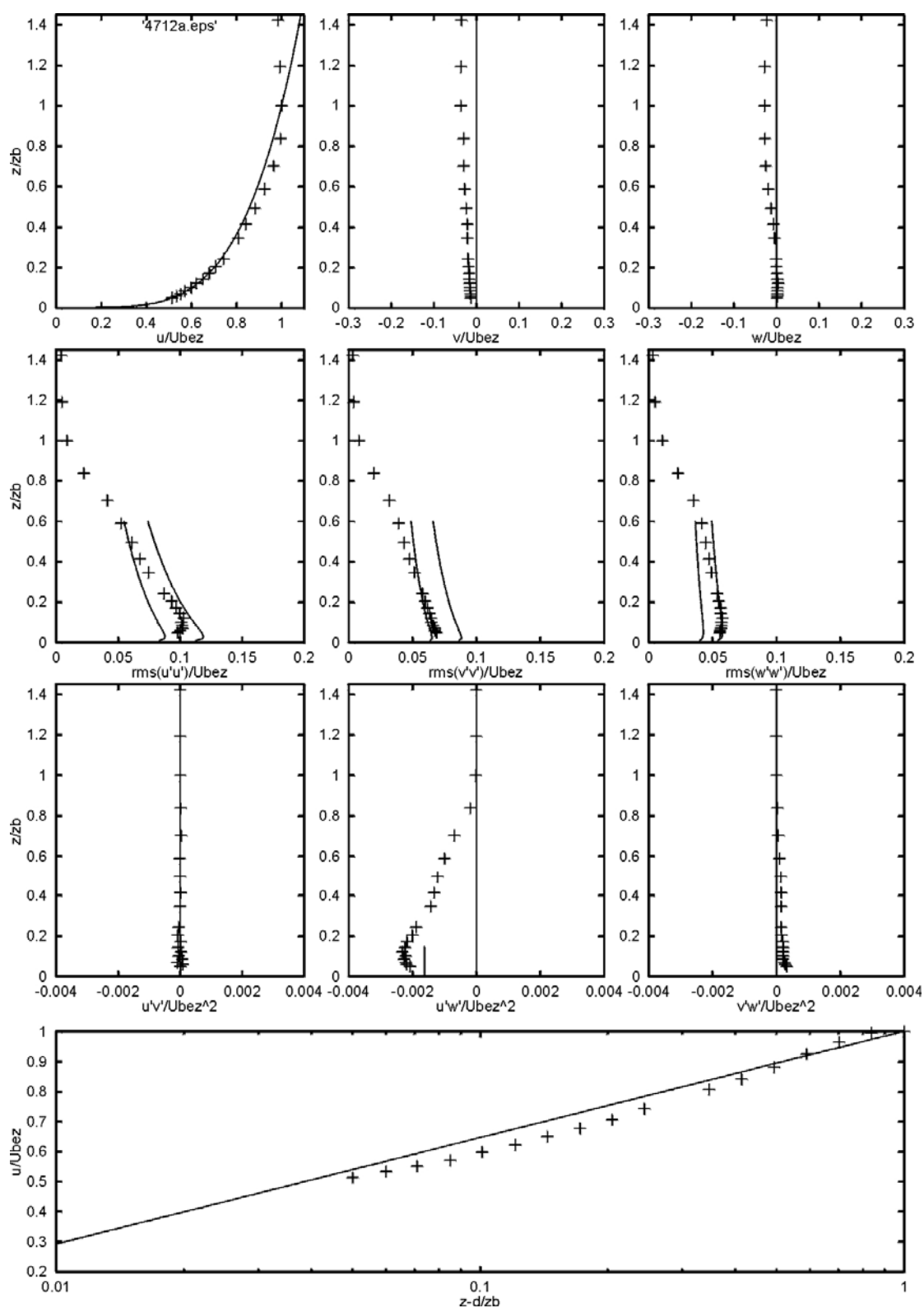


Sl. C26: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0$  mm,  $y = -240$  mm

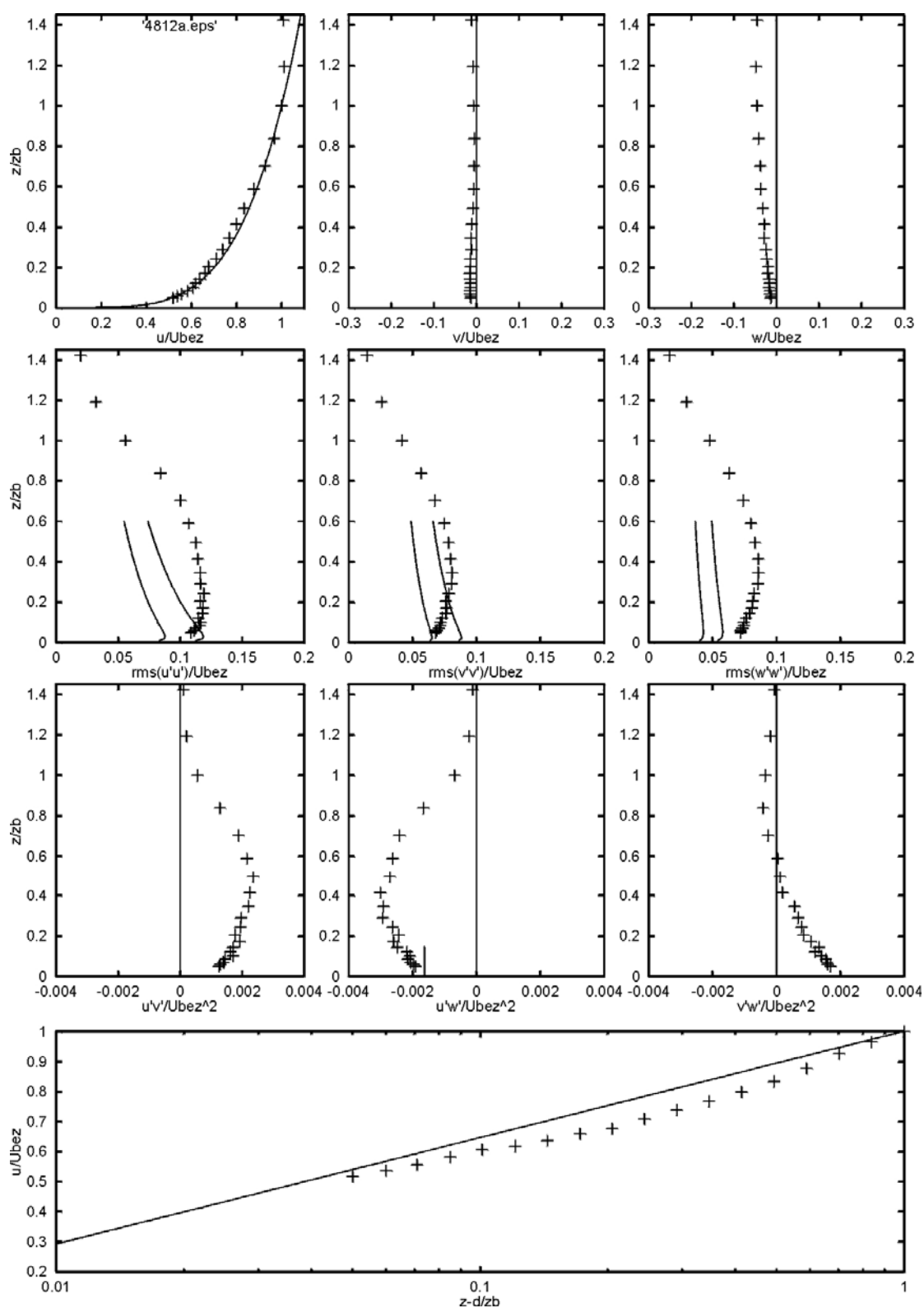


Sl. C27: Barijera 5, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = -2000$  mm,  $y = 0$  mm

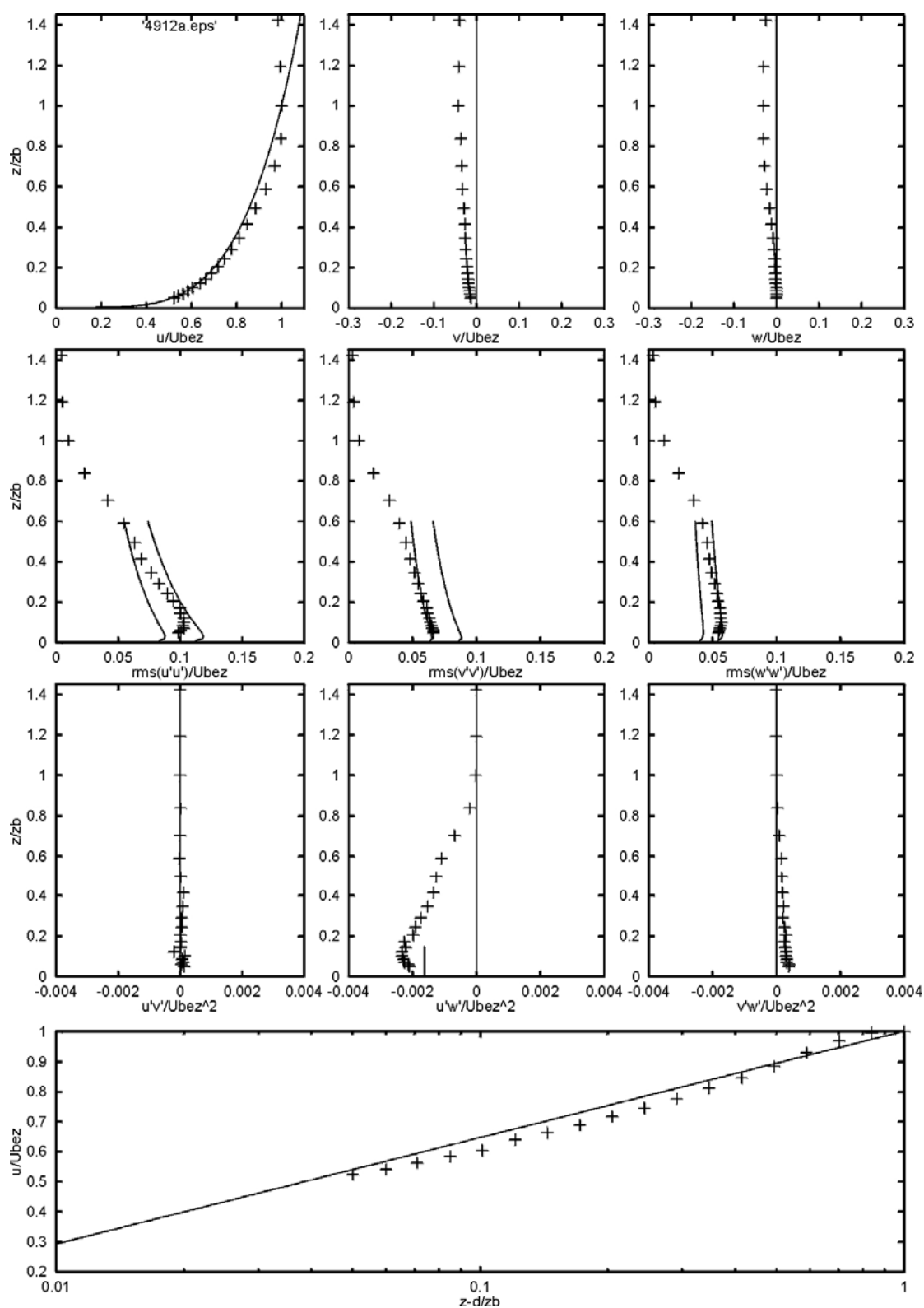




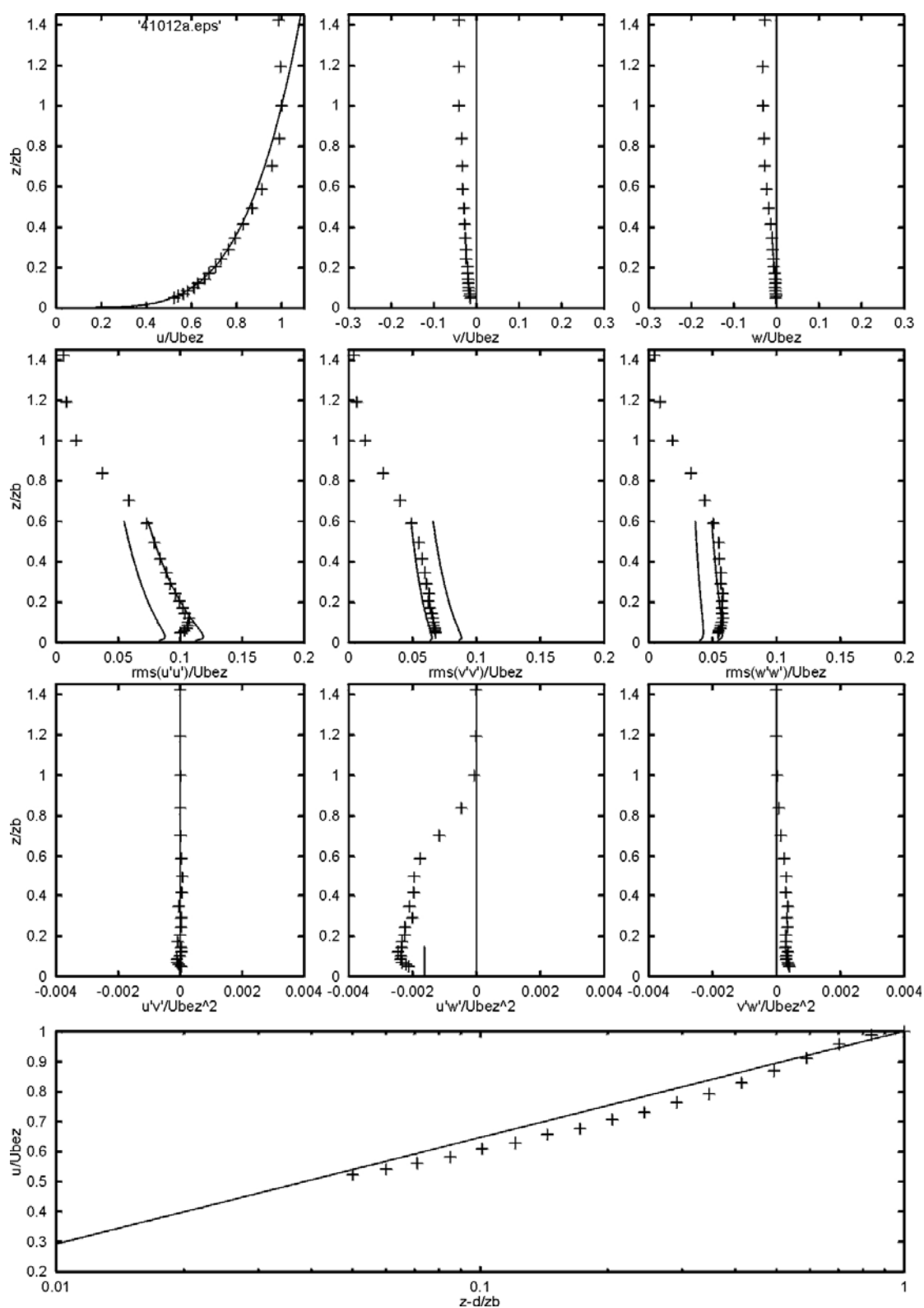
Sl. C28: Barijera 7, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$



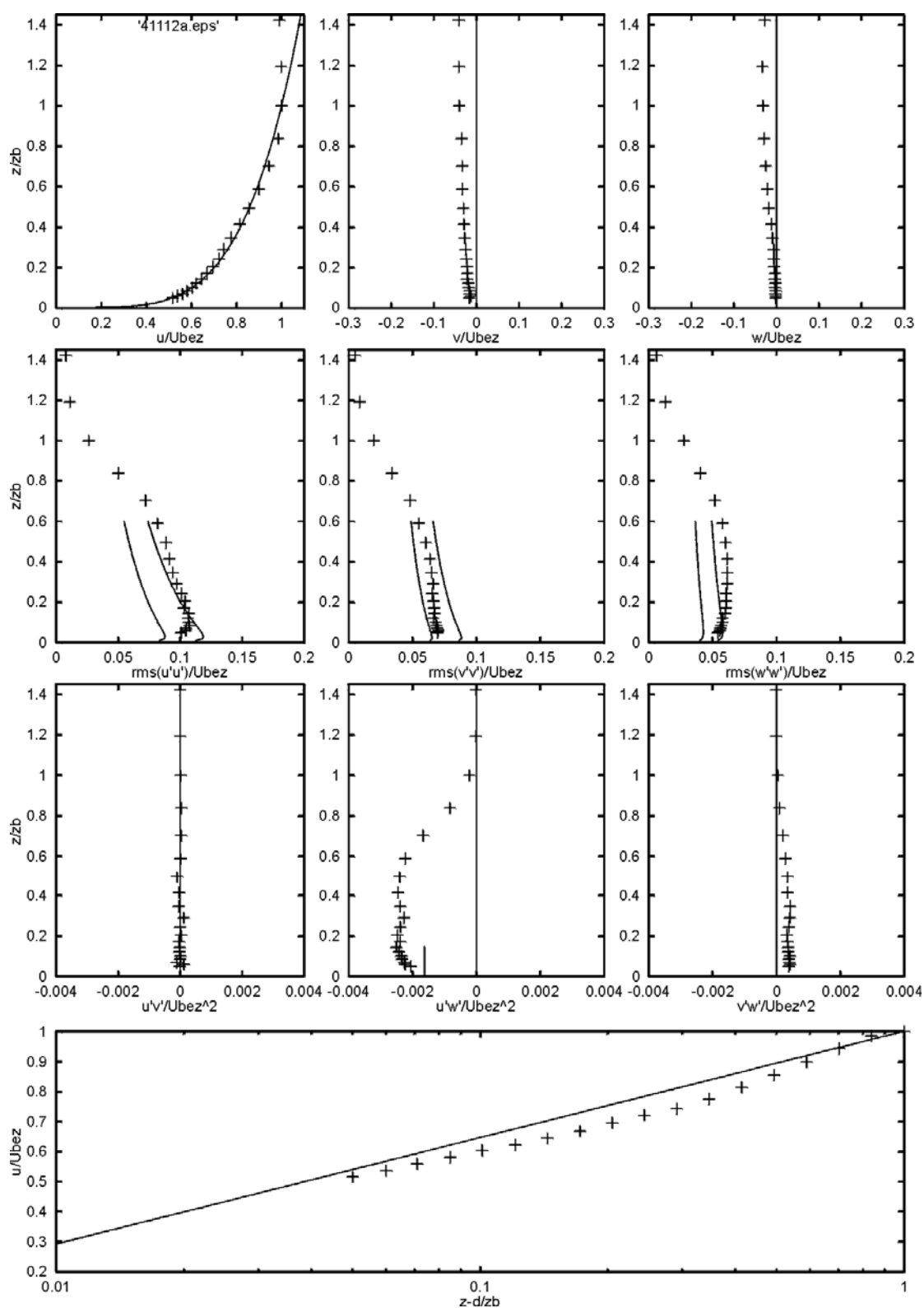
Sl. C29: Barijera 8, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$



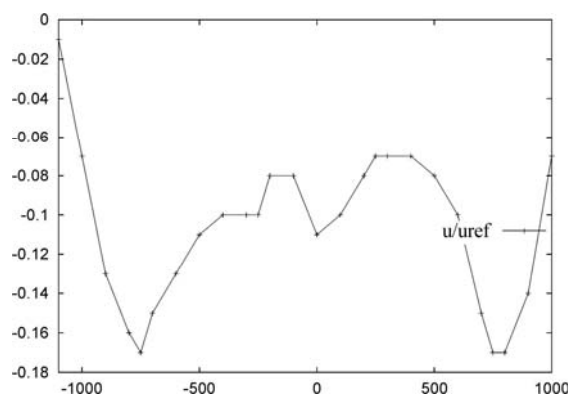
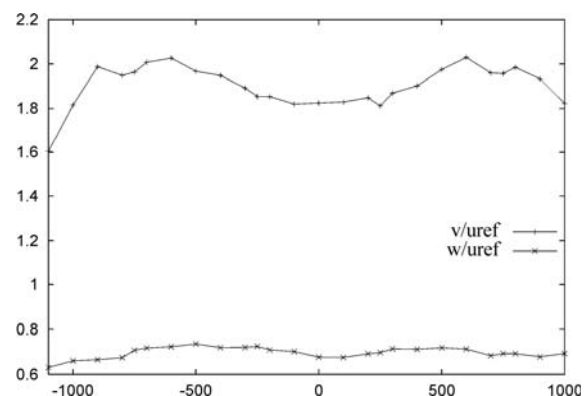
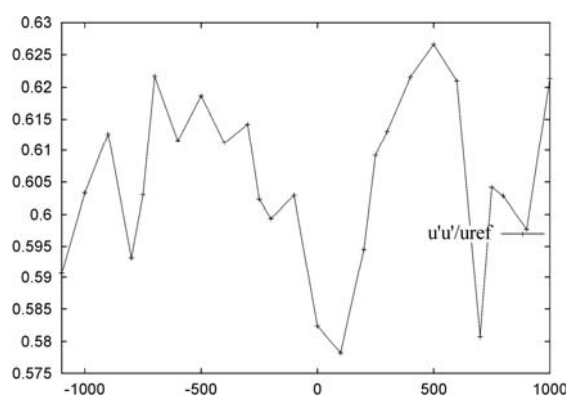
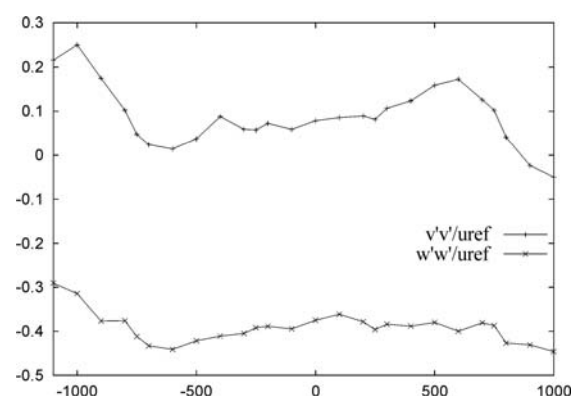
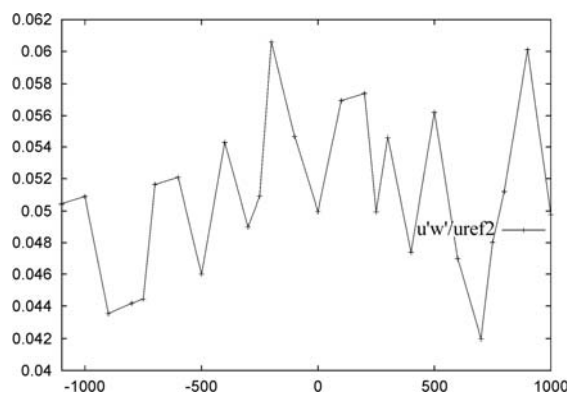
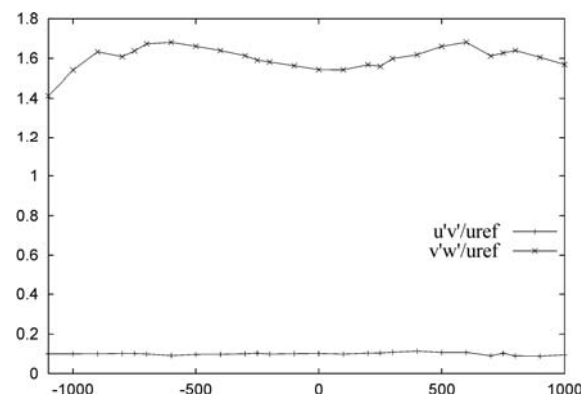
Sl. C30: Barijera 9, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$



Sl. C31: Barijera 10, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$



Sl. C32: Barijera 11, podna hrapavost R4, brzina  $\approx 12$  m/s (regulacija broja okretaja;  $n = 400 \text{ min}^{-1}$ ), suport,  $x = 0 \text{ mm}$ ,  $y = 0 \text{ mm}$


 $u / u_{\text{ref}}$ 

 $v / u_{\text{ref}} ; w / u_{\text{ref}}$ 

 $\sqrt{u'u'} / u_{\text{ref}}$ 

 $\sqrt{v'v'} / u_{\text{ref}} ; \sqrt{w'w'} / u_{\text{ref}}$ 

 $\sqrt{u'w'} / u_{\text{ref}}^2$ 

 $\sqrt{u'v'} / u_{\text{ref}}^2 ; \sqrt{v'w'} / u_{\text{ref}}^2$ 

Sl. C33: Promjena mjernih vrijednosti duž y osi uz  $x = 0$  mm i  $z = 100$  mm

TABLIČNI ŽIVOTOPIS

Prezime, ime:	KOZMAR, HRVOJE
Datum rođenja:	16. STUDENI 1968.
Mjesto rođenja:	SPLIT, HRVATSKA
Bračno stanje:	OŽENJEN
Osnovna škola:	1975. – 1983. SPLIT
Srednja škola:	1983. – 1987. MATEMATIČKO-INFORMATIČKI OBRAZOVNI CENTAR, SPLIT 1982. – 1986. CENTAR ZA ODGOJ I OBRAZOVANJE U UMJETNOSTI I KULTURI, SPLIT
Vojni rok:	RUJAN 1987. – RUJAN 1988.
Studij:	1988. – 1989. SVEUČILIŠTE U SPLITU FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE STUDIJ STROJARSTVA 1989. – 1994. SVEUČILIŠTE U ZAGREBU FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE STUDIJ STROJARSTVA, SMJER PROCESNO-ENERGETSKI
Poslijediplomski studij:	1994. – 2000. SVEUČILIŠTE U ZAGREBU FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE POSLIJEDIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVA, SMJER PLIN I PLINSKA TEHNIKA
Namještenja:	SIJEČANJ 1995. - OŽUJAK 1996. DIPL. ING. STROJARSTVA, FIRMA „SOLTECH“ U ZAGREBU OŽUJAK 1996. - OŽUJAK 1998. ASISTENT NA KATEDRI ZA MEHANIKU FLUIDA, FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE SVEUČILIŠTA U ZAGREBU OŽUJAK 1998. – VELJAČA 2000. ASISTENT NA KATEDRI ZA MEHANIKU FLUIDA, STROJARSKI FAKULTET TEHNIČKOG SVEUČILIŠTA U MÜNCHENU (GODIŠNJA STIPENDIJA MINISTARSTVA ZNANOSTI I TEHNOLOGIJE REPUBLIKE HRVATSKE, DAAD GODIŠNJA STIPENDIJA) VELJAČA 2000. – ASISTENT NA KATEDRI ZA MEHANIKU FLUIDA, FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE SVEUČILIŠTA U ZAGREBU
Znanje jezika:	HRVATSKI – MATERINJI JEZIK NJEMAČKI – VRLO DOBRO ENGLESKI – VRLO DOBRO

TABELLARISCHER LEBENS LAUF

Name, Vorname: KOZMAR, HRVOJE

Geburtsdatum: 16. NOVEMBER 1968

Geburtsort: SPLIT, KROATIEN

Familienstand: VERHEIRATET

Schulbildung: 1975 - 1983  
GRUNDSCHULE SPLIT

Berufsausbildung: 1983 - 1987  
MATHEMATISCH-INFORMATISCHE  
SEKUNDARSCHULE  
ABSCHLUSS ALS MATHEMATIKER-INFORMATIKER  
1982 - 1986  
MUSIK-SEKUNDARSCHULE  
ABSCHLUSS ALS GITARRENSPIELER

Wehrdienst: 12 MONATE

Studium: 1988 - 1989  
UNIVERSITÄT SPLIT, KROATIEN  
FAKULTÄT FÜR ELEKTROTECHNIK, MASCHINEN- UND  
SCHIFFBAU  
1989 – 1994  
UNIVERSITÄT ZAGREB, KROATIEN  
FAKULTÄT FÜR MASCHINEN- UND SCHIFFBAU  
ABSCHLUSS ALS DIPL.-ING. DES MASCHINENBAUS

Weiterbildung: 1994 - 2000  
UNIVERSITÄT ZAGREB, KROATIEN  
FAKULTÄT FÜR MASCHINEN- UND SCHIFFBAU  
POSTGRADUIERTENSTUDIUM,  
FACHRICHTUNG GAS UND GASTECHNIK

Tätigkeit: JANUAR 1995 - MÄRZ 1996  
DIPL. -ING. DES MASCHINENBAUS IN DER  
MASCHINENBAUFIRMA „SOLTECH“ IN ZAGREB  
MÄRZ 1996 - MÄRZ 1998  
ASSISTENT AM LEHRSTUHL FÜR FLUIDMECHANIK, FAKULTÄT  
FÜR MASCHINEN- UND SCHIFFBAU, UNIVERSITÄT IN ZAGREB  
MÄRZ 1998 – FEBRUAR 2000  
GASTWISSENSCHAFTLER AM LEHRSTUHL FÜR  
FLUIDMECHANIK, TU-MÜNCHEN  
(JAHRESSTIPENDIUM DES KROATISCHEN MINISTERIUMS FÜR  
WISSENSCHAFT UND TECHNOLOGIE, JAHRESSTIPENDIUM DES  
DAAD)  
FEBRUAR 2000 –  
ASSISTENT AM LEHRSTUHL FÜR FLUIDMECHANIK, FAKULTÄT  
FÜR MASCHINEN- UND SCHIFFBAU, UNIVERSITÄT IN ZAGREB

Sprachkenntnisse: KROATISCH - MUTTERSPRACHE  
DEUTSCH - SEHR GUT  
ENGLISCH - SEHR GUT